

摘要

在传统的有线工业控制网络应用中，通信节点往往受到各种环境条件的限制，无法实现有线连接。这种情况下，实现通信节点间的无线互联就显得极为重要。蓝牙和 802.11b 是目前颇具优势的两种无线技术，两者在工业控制网络中的应用正逐渐成为研究的热点。

本文首先分析了 802.11b 和蓝牙在工业以太网中的应用趋势，结合 802.11b 技术的特点和工业现场领域的要求，起草了国家标准《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》中“EPA 中的 802.11b 接入”部分；同时，由于 802.11b 和蓝牙都工作在 2.4GHz ISM 频段，随着两种技术在工业以太网共享环境中的应用，将会造成两个系统之间的相互干扰，因此，本文着重对 802.11b 和蓝牙的共存问题展开深入研究，分析了蓝牙和 802.11b 系统的共存干扰，介绍了两种类型的共存机制，重点讨论了自适应跳频机制的基本原理和关键技术，提出并设计了两种信道评估分类方法；最后，对自适应跳频机制中的“分段序列发生器”提出改进思想，给出改进算法的设计过程和实现方法，就存在的问题提出进一步的工作，并通过对两者性能的对比，证明改进算法的优越性。

关键词： 802.11b，蓝牙，工业以太网，EPA，共存，自适应跳频

Abstract

In traditional wired industrial network, the communicating nodes always suffer limits from various environments, and cannot realize wired connection. In this case, wireless connection between communicating nodes is very important. 802.11b and Bluetooth are both dominant wireless technology, the research about 802.11b and Bluetooth applications in industry Ethernet is becoming a focus in many areas.

This thesis first analyzes the applications of 802.11b and Bluetooth technology in industry Ethernet, according to 802.11b technic and requirements in industry Ethernet, drafts 802.11b access to EPA network, which is a part of EPA system structure and communication standard applying to industry measure and control system. As for 802.11b and Bluetooth are both in the 2.4GHz ISM spectrum, when both two are in the shared industry Ethernet, interference is within each other. Then, this thesis analyzes the coexistence interference between these two systems, and introduces two types of coexistence mechanism, emphasized on the fundamental and key technique of AFH, gives and designs the methods of channel evaluating classification. Finally, this thesis presents an improved idea of 'partition sequence generation', and designs the improved arithmetic and provides realization method, as for some difficulties, further study is needed, then, proves this arithmetic is more excellent than 'partition sequence generation'.

Key words: 802.11b, Bluetooth, Industry Ethernet, EPA, coexistence, adaptive frequency hopping

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 重庆邮电学院 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名: 徐润 签字日期: 2004年5月20日

学 位 论 文 版 权 使 用 授 权 书

本学位论文作者完全了解 重庆邮电学院 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 重庆邮电学院 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 徐润 导师签名: 徐经吉

签字日期: 2004年5月20日 签字日期: 2004年5月20日

第一章 绪论

1.1 蓝牙技术、802.11b 技术与工业以太网

1.1.1 蓝牙技术简介^[1]

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信的开放性全球规范, 它以低成本的近距离无线连接为基础, 为固定与移动设备通信环境建立一个特别连接。如果把蓝牙技术引入到移动电话和膝上电脑中, 就可以除去移动电话与膝上电脑之间的连接线缆而通过无线方式进行通信。打印机、传真机、游戏杆等数字设备都可以成为蓝牙系统的一部分。除此之外, 蓝牙无线技术还为已经存在的数字网络和外设提供通用接口以组成一个远离固定网络的个人特别连接设备群。蓝牙就是为了满足人们在个人操作空间的无线互联而设计的, 它使用跳频技术使处于个人操作空间的设备形成一个无线个人区域网络, 真正实现设备之间可移动的、自动的互联。蓝牙正发展成为个人区域网络或短距离无线网络的标准。

1997年7月, 蓝牙SIG公布了蓝牙标准的1.0版本, 但它实际上只是个草案。直到1999年12月, 蓝牙SIG才推出蓝牙标准的第一个正式版本1.0b。当前上市的蓝牙产品基本上都是遵循最新的蓝牙标准1.1版, 它是2001年2月发布的。

蓝牙技术运行在2.4GHz的ISM频段上; 采用时分双工传输方式和跳频技术。蓝牙定义了79跳和23跳两种跳频信道系统, 为增强蓝牙的抗干扰性, 建议采用蓝牙跳频方案中的79跳系统。每个信道的带宽为1MHz, 跳频速率达1600次/秒。蓝牙使用的调制方式为高斯频移键控(GFSK), 设计的发射功率最大为100mW, 最小为1mW。蓝牙定义的传输距离为10~100m。

1.1.2 802.11b 技术简介^[2]

目前, 无线局域网IEEE802.11系列标准有IEEE802.11、IEEE802.11b、IEEE802.11a等。其中IEEE802.11b标准是使用最多的无线局域网标准, 它利用射频技术取代旧式碍手碍脚的双绞铜线所构成的局域网络, 使得无线局域网络能利用简单的存取构架让用户透过它, 达到“信息随身化、便利走天下”的理想境界。

IEEE802.11b是IEEE802.11的一个扩充, 采用ISM2.4GHz频段, 调制方式采用补码键控(CCK), CCK源于直接序列扩频技术, 多速率机制的介质控制(MAC)确保当工作站之间距离过长或干扰太大、信噪比低于某个时限时, 传输速率能够从11Mbps自动降到5.5Mbps, 或根据直接序列扩频技术调整到2Mbps。

和 1Mbps。802.11b 可以和 1Mbps 和 2Mbps 的 802.11DSSS 系统互操作，但是无法和 1Mbps 和 2Mbps 的 FHSS 系统一起工作。

利用 802.11b，移动用户能够获得同 10Mbps 有线以太网相近的性能、网络吞吐量、可用性。

802.11b 运作模式基本分为两种：点对点模式和基本模式。点对点模式是指无线网卡和无线网卡之间的通信方式。基本模式是有线局域网的扩展或无线和有线网络互联的通信方式，这是 802.11b 最常用的方式。

1.1.3 工业以太网^[3]

现场总线技术始于 20 世纪 80 年代，它是当今自动化领域技术发展的热点之一。现场总线是综合运用微处理器技术、网络技术、通信技术和自动控制技术的产物，它可采用多种传输介质传送数字信号。现场总线技术把微处理器置入现场设备中，并将现场设备（如数字传感器、变送器、仪表与执行机构等）与工业过程控制单元、现场操作站等进行互连形成计算机网络，从而使整个系统具有全数字化、分散、双向传输和多分支的特点，是工业控制网络向现场级发展的产物。它的主要优点在于：能降低系统的投资成本、节省维护开销、提高系统的准确性和可靠性、以及增大用户系统集成的自主性等。然而现场总线仍存在很大的局限性。首先，现场总线主要是低速网络，现场仪表和设备的计算能力和信息处理能力较低，主要用于数据采集和控制信号的输出，只能实现一些简单的控制算法。其次，目前出现了 Profibus、FF、LonWorks、CAN-等多种现场总线，现场总线没有一个统一的标准，各种现场总线产品之间很难实现互操作。现场总线自身技术的局限性以及多种总线标准共存的局面，限制了现场总线技术在工业控制网络中的进一步发展。

以太网是在 20 世纪 70 年代研制开发的一种基带局域网技术，随着 Internet 技术的不断发展，以太网和 TCP/IP 协议已成为世界范围内的事实标准，基于 TCP/IP 协议的以太网可以满足工业控制系统各个层次的需求。与以往的工业控制网络相比，基于以太网的工业控制网络具有很多优势。以太网有更高的通信带宽，能够满足不断增长的数据通信的需要。通过 TCP/IP 协议，可以方便的实现现场设备层和企业管理层的无缝连接。而且，以太网设备价格低廉，实现简单，能够大大降低控制系统的成本。而随着高速以太网和交换式以太网技术的发展，以太网作为工业控制网络在实时性方面的问题正逐渐得以解决。种种迹象表明，基于以太网的工业控制网络将成为下一代工业控制网络的重要选择，并将带来工业控制网络新的变革。

1.2 无线通信技术在工业以太网中的应用

1.2.1 无线以太网应用需求及优点^{[4], [5]}

无线以太网是对以太网的逻辑扩展。在传统的有线工业控制网络应用中，布线的成本有时会大大超过其它控制设备的成本，而且电缆的连接也限制了现场设备的移动和网络的重组。与此同时，一些工业环境禁止使用电缆（如超净或真空封闭的房间）、或者很难使用电缆来传送数据（如高速旋转的设备）。

面对以上的问题，我们提出了结合使用现场总线通信技术和无线技术的解决方案。通过这种方式，我们的控制网络就在现场总线体系结构的基础上兼有了无线通信的优点。具体表现在：

- 现场设备无需电缆即可与控制网络连接，组网灵活、方便，同时又增加了现场设备的灵活性和可移动性。
- 便于与原有控制网络的整合。设备无需布线便可安装于现有环境，减少了系统的维护费用。
- 对于一些远距离控制，采用无线技术可扩大控制范围、延长控制距离；对于在一些不可预知的环境，尤其是不适用于布线的强腐蚀恶劣环境，可以使用无线通信来完成对现场设备的控制。

因此，在工业控制网络中引入无线技术，设计全新的无线/有线混合工业控制网络通信体系，既是降低投资成本的需要，也是解决现实问题的迫切要求。

1.2.2 蓝牙在工业以太网中的应用^[6]

众所周知，蓝牙在个人终端、办公系统以及信息家电等领域已经或正在获得应用。由于蓝牙既可以进行点对点通信，也可以进行点对多点通信，同时还可以组建局域网，因而可以满足多种应用需求。作为“电缆替代”技术提出的蓝牙技术，可以使不同厂家生产的设备在没有电缆连接的情况下实现互连互通，这显然对改造传统的有线工业控制网络具有重要的实践意义和市场价值。

当前，在工业控制领域中引入蓝牙技术的研究才刚刚起步。为在市场竞争中占得先机，国内外已经有一些公司推出了自己的蓝牙传感器、蓝牙控制器和蓝牙适配器产品。

目前，市场上的蓝牙产品可分为三类：点对点应用产品、点对多点应用产品和局域网网络产品。从蓝牙技术发展的过程来看，第一代蓝牙产品主要提供话音通信功能，第二代蓝牙产品则主要提供带有嵌入式蓝牙模块的数据通信功能。很显然，嵌入式蓝牙模块产品的推出，为蓝牙在工业以太网中的应用打下了坚实的

基础。

1.2.3 802.11b 在工业以太网中的应用^{[3], [7]}

1. 应用分析

在工业自动化领域, 有成千上万的感应器, 检测器, PLC, 读卡器, 或其他设备互相连接形成一个控制网络, 作为信息系统内管理数据的工具。通常这些设备提供的通信接口是 RS-232, 如何使现有的设备可立即联网使用呢? 一个经济、快速的解决方案, 利用 802.11b 无线局域网技术连接工业自动化设备, 如图 1.1 所示。新型的 802.11b 设备能隔离型信号转换器, 将工业设备的串口 RS-232 信号与 802.11b 及以太网络信号相互转换, 符合无线局域网 IEEE 802.11b 和以太网络 IEEE 802.3 标准, 支持标准的 TCP/IP 网络通信协议, 有效的扩展了工业设备的联网通信能力, 使工业设备立即联网, 并且, 固定的工业设备成为可以自由移动的无线网络终端。

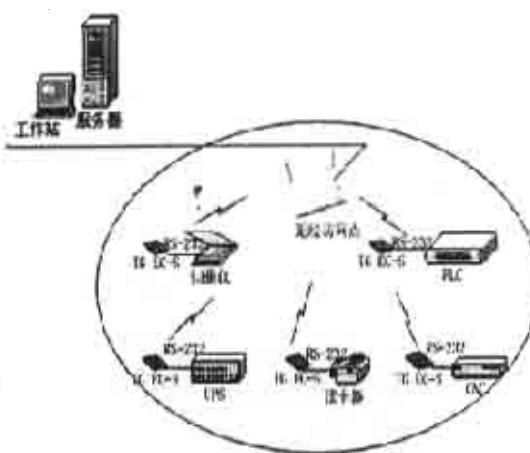


图 1.1 802.11b 无线局域网连接串口工业设备

计算机网络技术、无线技术以及智能传感器技术的结合, 产生了“基于无线技术的网络化智能传感器”的全新概念。这种智能传感器集成了数据采集、数据处理和无线网络接口模块, 无线网络接口模块底层网络接口(硬件接口)采用基于 IEEE 802.11b 的网络接口芯片, 高层网络接口(软件接口)采用 TCP/IP 协议, 把 TCP/IP 协议作为一种嵌入式应用, 即把 TCP/IP 协议固化到智能传感器的 ROM 中, 使得现场数据的收发都以 TCP/IP 协议进行。这种基于无线技术的网络化智能传感器使得工业现场的数据能够通过无线链路直接在网络上传输、发布和共享。

通过使用基于无线技术的网络化智能传感器, 结合目前市场上出现的各种基

于 IEEE 802.11b 的无线局域网网桥，就可以实现无线局域网技术在工业控制网络中的一种应用方案。在这里，无线局域网网桥用作无线访问点（AP），基于无线技术的网络化智能传感器采集现场数据、处理，并以 TCP/IP 协议对数据进行打包，通过无线链路发送到 AP，由于无线链路和有线以太网高层均采用 TCP/IP 协议，且低层协议对高层协议是透明的，就实现了无线网络和有线网络的无缝连接，通过 Internet，就可以实现远程监控。

2. 前景分析^[3]

IEEE802.11b 是 IEEE 最初制定的一个无线局域网标准，主要用于解决办公室局域网和校园网中，用户与用户终端的无线接入。业务主要限于数据存取，速率最高能达到 11Mb/s。802.11b 无线局域网是利用无线电波而非线缆来实现与计算机设备位置无关的网络数据传输系统，是现代数据通信系统发展的重要方向。802.11b 是一种灵活的数据传输系统，使用无线射频(RF)技术越空收发数据，减少使用线缆的连接，因此 802.11b 无线网络系统既可达到建设计算机网络系统的目的，又可让设备自由安排和随意移动。802.11b 协议除了可以向用户提供高速率的无线通信，在一些有干扰和不稳定的环境下，物理层的扩频机制和 MAC 层的根据信道状况动态调整传输速率的机制保证了设备间的通信质量。802.11b 协议的这些特点使它在工业控制领域有较好的应用前景。

随着各种 802.11b 无线设备的推出，802.11b 无线技术在工业以太网中的应用将更加广泛，为了规范工业以太网中的 802.11b 接入，我们需要制定一个统一的 802.11b 接入标准，以提供统一的接入接口和服务。

1.3 本论文主要研究内容和各章节简介

1.3.1 本论文主要研究内容

本论文涉及国家标准《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》中“EPA 网络中的 802.11b 接入标准”的研究，同时，重点对 802.11b 与蓝牙的共存问题展开研究。主要包括以下三个方面的内容：

1. 制定符合工业以太网实时性、容错性和安全性要求的“EPA 网络中的 802.11b 接入标准”；
2. 研究 802.11b 和蓝牙的共存应用干扰；
3. 研究自适应跳频共存机制的应用，给出信道评估方法并提出基于自适应跳频的算法改进及实现方法。

1.3.2 各章节内容简介

本论文一共分为六章，各章内容安排如下：

第1章“绪论”，在引入无线以太网概念和优点的基础上，分析802.11b和蓝牙在工业以太网中的应用；

第2章“EPA网络中的802.11b接入标准”，结合802.11b技术的特点和工业现场领域的要求，起草了《用于工业测量与控制系统的EPA系统结构和通信标准》中“EPA网络中的802.11b接入标准”部分；

第3章“802.11b与蓝牙的共存性”，通过对802.11b与蓝牙的共存应用模型及共存所带来的相互干扰的分析，讨论共存机制；

第4章“自适应跳频在蓝牙中的应用”，分析自适应跳频基本原理和关键技术，对信道分类提出了两种评估方法；

第5章“基于自适应跳频的算法改进”，根据蓝牙信道传输特性，设计“分段序列发生器”的改进方法，详细分析设计原理，实现方法，提出还有待完善的工作，并对改进前后的性能进行对比；

第6章“结束语”，对全文进行总结，提出进一步的工作。

1.4 本章小结

本章首先介绍了802.11b技术、蓝牙技术和工业以太网的概念、特点，并在引入无线以太网概念的基础上，着重对蓝牙技术和802.11b技术在工业以太网中的应用领域和应用前景进行了讨论，并指出制定工业以太网中802.11b接入标准的重要意义。最后，归纳了本文的主要研究内容。

第二章 EPA 网络中的 802.11b 接入

“EPA”是基于以太网工厂自动化，应用于工业现场级设备之间的一种通信标准。《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》针对工业测量与控制系统网络通信特点，以工业控制工程师为应用对象，规定了以太网（和无线技术）、TCP/IP 之上的应用层、用户层以及认证、测试与应用行规，以以太网和无线技术统一管理层、监控层和现场设备层等工业企业综合自动化系统的所有网络层次，实现各网络层次上信息的无缝集成，为用户应用程序提供服务接口以及相关管理方面的规范。

本人参与了《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》的讨论与制定，并承担了其中“EPA 中的 802.11b 接入标准（以下简称“802.11b 接入标准”）”的起草工作，该接入标准为规范 802.11b 接入工业控制网络提供了统一的接口和服务。目前国内外还没有有关控制网络中的 802.11 接入协议方面的报道。

2.1 EPA 通信模型^[8]

2.1.1 EPA 通信模型

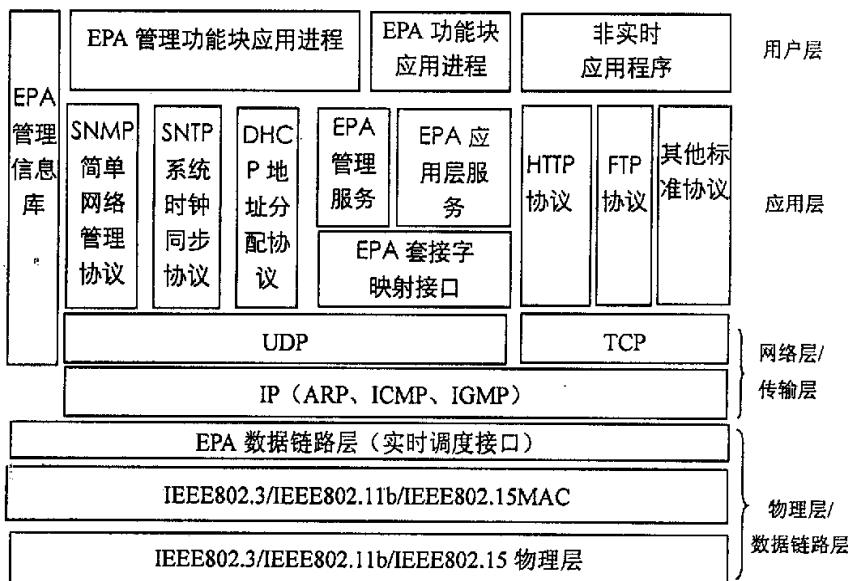


图 2.1 EPA 通信模型

EPA 通信模型如图 2.1，参考 ISO/OSI 开放系统互连模型，低四层采用 IT 领

域的通用技术，其中物理层与数据链路层兼容 IEEE802.3、IEEE802.11b、IEEE802.15，网络层以及传输层采用 TCP(UDP)/IP 协议，并在网络层和 MAC 层之间定义了一个 EPA 通信调度接口，完成实时信息和非实时信息的传输调度。会话层和表示层未使用。应用层定义了 EPA 应用层协议和服务、EPA 套接字映射接口以及 EPA 管理功能块及其服务，同时还支持 IT 领域现有的协议，包括：HTTP、FTP、DHCP、SNTP、SNMP 等。另外增加了用户层，采用基于 IEC61499 和 IEC61804 定义的功能块及其应用进程。

EPA 通信结构模型与 ISO / OSI 七层通信结构模型之间的关系，如表 2.1 所示。

表 2.1 EPA 通信模型同 ISO/OSI 七层参考模型比较

ISO OSI 七层参考模型	EPA 通信结构模型
	(用户层) 用户应用进程
应用层	HTTP、FTP、DHCP、SNTP、SNMP、EPA 应用层规范、EPA 管理功能块
表示层	未使用
会话层	未使用
传输层	TCP/UDP
网络层	IP
数据链路层	实时通信调度接口
物理层	IEEE 802.3/ IEEE 802.11b/ IEEE 802.15

2.1.2 EPA 设备间的通信过程

如图 2.2 所示表明了两个 EPA 设备之间的通信过程，为了实现两个功能模块之间的通信，每个 EPA 设备还有 EPA 通信栈（包括 EPA 链接对象、EPA 通信服务实体、EPA 套接字映射接口、UDP (TCP) /IP 协议等）以及 EPA 通信接口（如 IEEE802.3/IEEE802.11/IEEE802.15 等）。

在 IEEE802.11b 通信协议的应用层和以太网通信协议的应用层包含了应用层服务和套接字映射接口对象（图 2.2 所示），其中应用层服务（包括实时和非实时服务）是为用户应用进程间的数据通信提供的接口，而套接字映射接口对象则是应用层服务与 UDP (TCP) 层的接口。用户应用进程在调用应用层服务时，应该提供所有服务所需要的参数，然后由应用层服务将数据经过编码后，传给套接字映射接口对象，调用 UDP (TCP) 数据传输服务把数据发送出去。

在接收时，应用层套接字映射接口对象收到来自通信端口的数据后，上传给应用层服务，由应用层服务根据服务报文中的目的应用进程标识 ID，而将接收到的数据传送到用户层中相应的用户应用进程，由用户应用进程对相应的参数进行更新和进一步的处理。

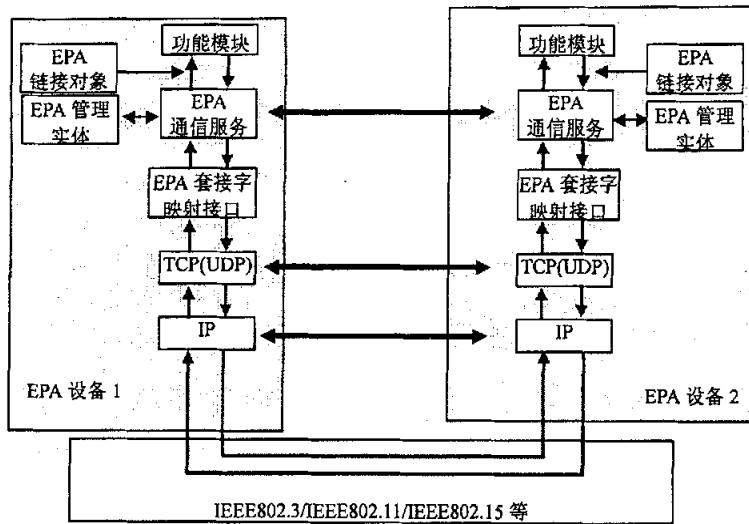


图 2.2 EPA 设备之间的通信

2.3 EPA 网络中的 802.11b 接入

“802.11b 接入标准”定义了通过 802.2 逻辑链路控制 (LLC) 协议和 802.1d 桥接协议，实现 IEEE802.11b 接入 EPA 网络的方法，该接入标准也适用于其他无线局域网协议（如 IEEE802.11，IEEE802.11a）。

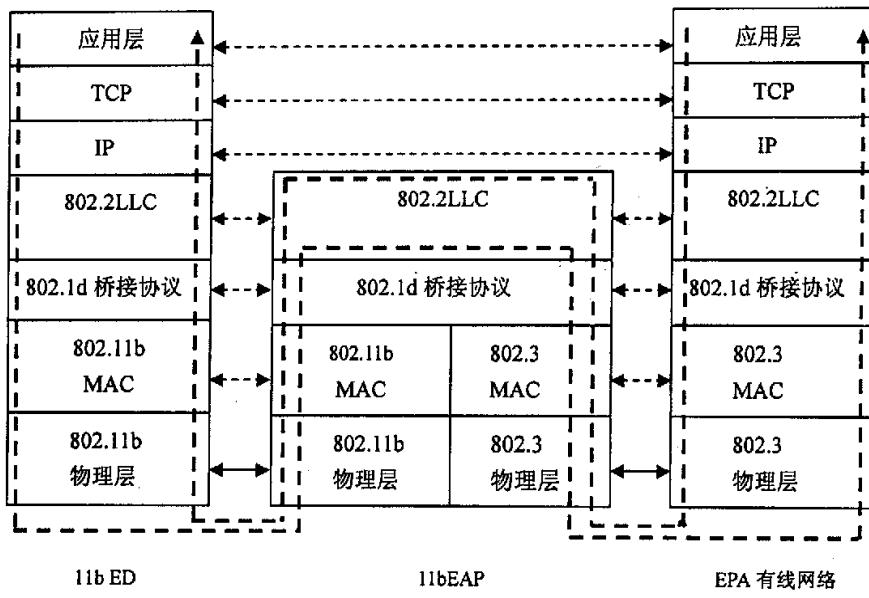
2.3.1 接入模型

本标准定义两类 802.11b 设备：802.11b EPA 现场设备(11bED)和 802.11b EPA 接入设备(11bEAP)。11bED 通过 11bEAP 可以接入有线局域网，实现无线与有线的互联操作。11bEAP 通常由一个无线输出口和一个以太网接口构成，11bEAP 中的桥接软件符合 802.1d 桥接协议。

本标准支持两种类型的接入：

- 11bED 间直接进行数据交换，无需其他设备的转接；
- 11bED 间通过 11bEAP 的连接进行互连与互操作，并可通过 11bEAP 连接有线局域网。

11bED 接入 EPA 有线网络的通信模型如图 2.3 所示，该接入模型中各层的功能如下：



注：信息流动用带箭头的粗虚线表示

图 2.3 802.11b EPA 现场设备接入模型

802.11b 物理层确定无线局域网的传输介质和频段分配，具有载波监听、传送和接收等功能。

MAC、802.1d 桥接协议和 802.2LLC 是无线局域网接入模型的数据链路层。

802.11b 的 MAC 层具有无线介质访问、网络连接以及提供数据验证和保密等功能。它详细规定了站点访问传输媒体不会发生碰撞的基础协议，采用 CSMA / CA 媒体访问控制机制，使各站点共享无线媒体。

802.2LLC 是由 IEEE 定义的一个可运行于所有 802LAN 和 MAN 协议之上的数据链路协议，它隐藏了各种 802 网络之间的差别，向网络层提供一个统一的格式和接口，这些格式、接口和协议完全基于 OSI。LLC 提供三种服务：不可靠的数据服务、有确认的数据报服务和可靠的面向连接的服务。它定义了所有 802LAN 类型的差错控制，提供寻址和数据链路控制服务。

802.1d 是由 IEEE 定义的连接不同类型的局域网（有线和无线）的桥接协议。每个 LAN 都有其独立的 MAC。802.1d 桥接协议由 MAC 层提供服务，而且对 802.2LLC 和网络层协议是透明的。

802.11b 使用 802.2LLC 和 802 系列标准定义的 48 位 MAC 地址，这使得无线和有线之间的连接非常方便。

同时在本接入协议中复用了 TCP (UDP) /IP 协议集，其中 UDP 协议不需要在通信两端建立连接和确认，可用于实时数据通信。而对于实时性要求不高、对传输的可靠性要求高的应用，可使用 TCP 协议，也可使用 UDP 协议。若使用

UDP 协议需在应用层提供传输可靠性保障机制。

2.3.2 802.11b EPA 现场设备的接入通信过程

11bED 通过 11bEAP 接入以太网络的过程如下：

- 复位：首先把 MAC 复位为初始条件，所有变量为默认值。
- 启动：MAC 复位以后，启动一个 BSS(基本服务集)，即创建一个新的 BSS。
- 加入网络：11bED 首先需要发现处于通信范围内且提供 MAC 服务的 11bEAP，即 11bED 采用主动扫描或被动扫描的方式发现并选择合适的 11bEAP，并与所选 11bEAP 进行同步。
- 认证：在 11bED 搜索到可加入的 BSS 并加入其中后，在建立连接之前需要一个认证过程。
- 关联：在认证的基础上，11bED 请求与所选的 11bEAP 建立关联。链路建立后，双方设备进行鉴权并要求数据加密。
- 数据传送：给 11bEAP 和 11bED 分配 IP 地址，在链路连接上传送 IP 数据包。
- 再关联：11bED 周期性地扫描所有频段，与另一个能提供更强信号或差错率更低的 11bEAP 同步认证，进行再关联。
- 重复上面两步，直到通信结束。

【注】在任何时候，11bED 和 11bEAP 都可以断开局域网连接。

11bED 之间的直接通信遵循 IEEE802.11b 标准。

连接完全建立之后，11bED 与 EPA 网络设备之间的通信过程可描述如下：

应用程序的数据经 TCP (UDP) /IP 打包后，在 LLC 层和 802.11b MAC 层分别加上各层的分组头对其进行封装，然后将封装过的数据包通过 RF 物理层发送给 11bEAP 的对应 RF 物理层。在 11bEAP，各对应层将对接收到的数据包进行解封，整个解封的过程与封装的顺序相反。解出的 IP 数据包将交给 LLC 层重新进行封装，并经 802.3 MAC 层进一步封装之后通过物理层接口传到 EPA 网络上。EPA 上的现场设备接收到上述数据包后，亦将执行解封的过程，直到得到发送端应用程序的数据为止。

2.3.3 802.11b 接入过程提供的服务^[8]

802.11b 接入过程中提供的服务是指同层 LLC 在 MAC 服务访问结点 (SAP) 之间交换 MAC 服务数据单元(MSDU: MAC Service Data Unit)的能力。这些服务是通过 MLME(MAC 层管理实体)和 SME(站点管理实体)提供的层管理服务接口发出的。

1. 复位

该机制支持 MAC 的复位过程。包括的服务原语有 MLME_RESET.request, MLME_RESET.confirm。MLME_RESET.request 由 SME 发出, MAC 复位为初始条件, 所有变量为默认值, SetDefaultMIB 参数变量为 true 时, MIB 属性值设为默认值。该原语必须在 MLME_START.request 原语之前使用, 用于请求 MAC 的复位; MLME_RESET.confirm 由 MLME 发出, 用于返回复位请求结果。

2. 启动

该机制支持创建一个新的 BSS 的过程。包括的服务原语有 MLME_START.request, MLME_START.confirm。

MLME_START.request 由 SME 发出, 启动一个构造 BSS (MAC 实体作为一个 11bEAP), 或启动一个独立 BSS: IBSS (MAC 实体作为 IBSS 内的第一个 11bED)。一旦当前的帧交换序列已完成, 该原语发起 BSS 初始化。MLME_START.request 必须在 MLME_RESET.request 用于复位 MAC 之后, 在 MLME_JOIN.request 用于成功加入一个已存在的构造 BSS 或独立 BSS 之前发出。已成功使用 MLME_START.request 或在没有发出 MLME_RESET.request 原语就成功使用 MLME_JOIN.request 之后, 不能使用 MLME_START.request。MLME_START.confirm 由 MLME 发出, 返回 MLME_START.request 创建一个新的 BSS 的结果。

3. 加入网络

(1) 11bED 扫描可供其加入的 BSS

当 11bED 的电源被打开后, 它在认证和连接到合适的 BSS 或 11bEAP 之前, 首先会检测有无现成的 BSS 或 11bEAP 可供其加入。11bED 通过被动或主动扫描方式 (由 Scan Type 参数决定) 完成上述搜索过程。在被动扫描模式下, 11bED 对每一个信道都进行一段时间的监听, 具体时间的长短由 Channel Time 参数确定。该设备只寻找具有本站希望加入的服务集 ID(SSID)的信标帧。主动扫描模式下, 11bED 发送包含有该站希望加入的 SSID 信息的探询 (Probe) 帧, 然后开始等待探询响应帧 (Probe Response Frame), 探询响应帧明确希望加入的 BSS 是否存在。探询请求和探询响应帧由 MAC 帧控制字段的 Type 和 Subtype 参数定义, 属于管理帧的一种功能。

该过程使用的服务是 MLME_SCAN。该服务支持可用 BSS 特性的确定过程, 包括的服务原语有 MLME_SCAN.request 和 MLME_SCAN.confirm。MLME_SCAN.request 由 SME 发出, 用于一个 11bED 扫描确定是否有 BSS (或 11bEAP) 可供其加入; MLME_SCAN.confirm 返回扫描过程检测到的 BSS 集的描述, 由 MLME 发出并确保 11bED 的运行环境。

(2) 与所选 11bEAP 同步

当 11bED 加入一个 BSS 或 ESS(扩展服务集)之后, 它从返回的 MLME_SCAN.

confirm 原语参数 BSS Description Set 中接收到 11bEAP 的 SSID、时间同步函数 (TSF: Timer Synchronization Function)、计时器的值和物理 (PHY) 安装参数等。BSS 中的 11bED 必须和 11bEAP 保持同步，从而保证所有的 11bED 和 11bEAP 工作在相同的参数下，同时也保证节能管理的正常运行。现场设备利用 BSS Description 中描述的时钟信息更新自己的时钟，以保证与 11bEAP 同步。该过程使用的服务是 synchronization。

该服务包括的服务原语有 MLME_JOIN.request 和 MLME_JOIN.confirm。MLME_JOIN.request 由 SME 发出，请求与一个 BSS 同步。MLME_JOIN.confirm 返回同步请求的结果，由 MLME 发出，确认与一个 BSS 同步。

4. 认证

在 11bED 搜索到可加入的 BSS 并加入其中后，在建立连接之前需要一个认证过程。

该过程使用的服务是 MLME_AUTHENTICATE，该服务支持与对等 MAC 实体的认证关系的建立过程，包括的服务原语有 MLME_AUTHENTICATE.request、MLME_AUTHENTICATE.confirm 和 MLME_AUTHENTICATE.indication。MLME_AUTHENTICATE.request 由 SME 发出；MLME_AUTHENTICATE.confirm 由 MLME 发出，描述认证结果；MLME_AUTHENTICATE.indication 由 MLME 发出，指示与特定对等 MAC 实体的认证关系的建立。

5. 关联

1) 若现场设备已认证：

(1) 关联请求。

11bED 发送一个 MLME_ASSOCIATE.request 给 11bEAP。使用的服务原语是 MLME_ASSOCIATE.request，由 SME 发出，请求与作为 11bEAP 的特定 MAC 实体关联。

(2) 关联响应。

11bEAP 接收到 MLME_ASSOCIATE.request 帧，则发送一个含状态编码的 MLME_ASSOCIATE.confirm，如果状态值是“success”，则 MLME_ASSOCIATE.confirm 中包含分配给该 11bED 的关联 ID，该现场设备开始与该 11bEAP 关联。如果 11bED 收到状态值不是“success”的关联响应帧或关联超时，则不与该 11bEAP 关联。然后 11bED 发回一个 MLME_ASSOCIATE.confirm 给 11bEAP 以指示关联成功或失败。一旦关联成功，11bED 就会将发送接受信号的频道切换为该 11bEAP 的频段。使用的服务原语是 MLME_ASSOCIATE.confirm，由 MLME 发出，描述关联请求的结果。

(3) 关联指示。

11bEAP 应由 MLME 发出一个 MLME_ASSOCIATE.indication 告知分布式系统该关联。支持与 11bED 对等 MAC 实体关联的建立。

2) 若 11bED 未认证

(1) 关联请求, 同上。

(2) 认证解除 (未建立关联)。

如果 11bEAP 从未认证的 802.11b 现场设备接收到 MLME_ASSOCIATE.request, 则应发送一个 DEAUTHENTICATE 帧给 11bED。该服务支持与对等 MAC 实体认证关系的解除过程, 包括的服务原语有 MLME_DEAUTHENTICATE.request、MLME_DEAUTHENTICATE.confirm 和 MLME_DEAUTHENTICATE.indication。MLME_DEAUTHENTICATE.request 由 SME 发出, 阻止在 11bED 和 11bEAP 间交换数据帧; MLME_AUTHENTICATE.confirm 由 MLME 发出, 描述与特定对等 MAC 实体解除认证的结果; MLME_AUTHENTICATE.indication 由 MLME 发出, 指示与特定对等 MAC 实体的认证关系的解除。

6. 在连接上传送数据

关联成功建立后, 随后在连接上传送数据。

1) 数据加密。

11bED 与 11bEAP 建立关联后, 使用数据加密协议。

802.11b 标准定义的加密规范是 WEP (Wired Equivalent Privacy)。WEP 子字段位于 MAC 帧头的帧控制字段。WEP 意在为无线网络提供与有线网络对等的安全保护。在无线网络中, 由于数据通过天线以广播方式传输, 因此如果没有一定的加密保护措施, 信号非常容易被入侵者截取。WEP 安全协议运作在 MAC 层, 提供访问控制及数据加密的机制, 所有的 11bED 和 11bEAP 使用的是同一个共享密钥。

2) 数据传输

由 11bED 接入模型的工作原理知, 11bED 与 EPA 网络设备之间的数据交换使用了 LLC/MAC 层提供的服务。LLC 具有与高级数据链路控制 (HDLC) 相似的功能。LLC 的目的是利用基于 802MAC 的受控链路, 在 LAN 上的两个终端用户间相互交换数据。LLC 提供寻址和数据链路控制服务。LLC 通过下列一组特定的服务原语与之相关的 MAC 层建立联系:

● MA-UNITDATA.request:

LLC 发送这个原语到 MAC 层要求数据帧从逻辑 LLC 实体转移到特定的同级 LLC 实体上或一组位于不同站点上的同级实体上。数据帧可能是一个信息帧, 包含高层数据或 LLC 内部产生的与同级 LLC 通信的控制帧。

● MA-UNITDATA.indication:

MAC 层发送这个原语给 LLC，将一个数据帧从 MAC 层传输到 LLC。只有当 MAC 确已发现它从物理层接受的帧是有效、无错的，而且目标地址表明 MAC 站点地址是正确的，上述情况才发生。

- MA-UNITDATA-STATUS. indication:

MAC 层发送该原语到 LLC 层提供关于前一个 MA-UNITDATA. request 原语提供的服务状态信息。

7. 再关联

11bED 与另一个 11bEAP (或原来的 11bEAP) 再关联。其过程如下：

1) 加入新网络，同 3。

(1) 11bED 扫描并发现可供其加入的新的 BSS。

如果 11bED 已与一个 11bEAP 建立关联，在随后的时间内，11bED 将周期性地扫描所有频段，以探测是否有其它 11bEAP 能够提供性能更高的服务。

(2) 与所选的新的 11bEAP 同步。

如果发现另一个 11bEAP 能提供更强的信号或更低的差错率，11bED 会与新 11bEAP 进行协商，然后将频道切换到新 11bEAP 的服务频道中，与之同步。

2) 认证，同 4。

3) 建立“再关联”。使用的服务是 MLME_REASSOCIATE。

该服务描述了 11bED 如何与 11bEAP 建立再关联，包括的服务原语有 MLME_REASSOCIATE. request、MLME_REASSOCIATE. confirm 和 MLME_REASSOCIATE. indication。MLME_REASSOCIATE. request 由 SME 发出，请求关联的改变；MLME_REASSOCIATE. confirm 由 MLME 发出，描述再关联请求的结果；MLME_REASSOCIATE. indication 由 MLME 发出，指示再关联的建立。

8. 重复 6、7 步，直到通信结束。

9. 断开关联

在任何时候 11bED 和 11bEAP 都可以断开连接。

断开局域网连接即断开关联，所使用的服务是 MLME_DISASSOCIATE。包括的服务原语有 MLME_DISASSOCIATE. request、MLME_DISASSOCIATE. confirm 和 MLME_DISASSOCIATE. indication。MLME_DISASSOCIATE. request 由 SME 发出，请求与作为 11bEAP 的特定 MAC 实体断开关联；MLME_DISASSOCIATE. confirm 由 MLME 发出，描述断开关联请求的结果；MLME_DISASSOCIATE. indication 由 MLME 发出，指示与特定对等 MAC 实体断开关联的建立。

2.3.4 802.11b 的环境适应性^[8]

1. 功率管理

802.11b 设备的 MAC 帧控制字段包含 Power Management 子字段，属于控制帧的一种功能。该字段指明发送站在完成目前的帧交换序列之后的功率管理模式。802.11b 设备有两种功率管理模式，激活模式和节能模式。字段值为‘0’时，设备处于激活模式，值为‘1’时，设备处于节能模式。接收站利用这个信息可以调整帧的发送，以避免唤醒节能状态的设备。激活模式处于唤醒状态。节能模式状态下的设备可被唤醒。

选用哪一种功率管理模式是由 MLME-POWERMGT. request 的 Power_Management_Mode 参数确定的，一旦功率管理模式被更新，MLME 应发出一个 MLME-POWERMGT. confirm 指示操作成功。要改变功率管理模式，设备应通过它发起的一个成功帧交换通知另一个设备。在帧交换中，设备发送一个数据帧，位于帧控制字段的功率管理模式 bit 指示了它将采用的功率管理模式。

2. 接入 EPA 的可靠性

11bED 接入 EPA 的可靠性主要通过提高它的抗干扰性和容错性来实现。

1) 抗干扰性

11bED 发送与接收无线电和激光信号的过程中“传输介质”是空气，所以无线系统很容易受到大气噪声干扰和其它发射系统的影响。而且，无线网络也会受到附近其它无线网络和无线电波设备的干扰，它通过以下机制来提高其抗干扰性。

(1) 物理传输方式

目前 802.11b 选择 DSSS 技术作为该标准的唯一物理传输方式。DSSS 局域网可在很宽的频率范围内进行通信，支持 1~2Mb/s、5.5Mb/s 和 11Mb/s 数据速率，在发送和接收端都以窄带方式进行，而传输过程中则以宽带方式通信。DSSS 同时使用整个频段，信号被扩展多次而无损耗。为了支持强噪声环境以及扩展的覆盖范围，802.11b 使用动态速率漂移，允许数据速率自动调整到适应无线通信的变化特性。在最理想的情况下，用户能够得到 11Mbps 的全速率连接。然而，当设备移动到覆盖范围之外，或者出现重要的干扰时，802.11b 设备将以较低的速率进行发射，这时，速率就会回落到 5.5Mbps、2Mbps 或 1Mbps。类似地，如果设备从低速率环境进入高速率环境，连接速率将自动提高。

(2) CSMA / CA

一般情况下，从 802.11b 的工作原理来讲，当一个 11bED 与 11bEAP 通信时，其他的终端都会处于静默状态。然后这些终端会侦听通信频带中的无线电波，当确认没有任何终端处于通信状态时才会开始通信。我们把这种原理称为载波侦听多路访问/冲突防止，即 CSMA/CA。

(3) RTS/CTS

RTS/CTS 协议即请求发送(RTS: Request to Send)/清除发送(CTS: Clear to Send)协议，相当于一种握手协议，主要用来解决“隐藏终端”问题。“隐藏终端”

(Hidden Stations) 是指, 当一个 11bED (假设为 A) 向 11bEAP (假设为 B) 发送信息, 另一个 11bED (假设为 C) 未侦测到 A 已向 B 发送, 故 A 和 C 同时将信号发送至 B, 引起信号冲突, 最终导致发送至 B 的信号都丢失了。为了解决这个问题, 802.11b 在 MAC 层上引入了一个新的 RTS/CTS 选项。

2) 容错性

(1) 差错检测机制

802.11b 物理层 PLCP 帧中包含 16 位的循环冗余校验码(CRC: Cyclic Redundancy Check)码(基于 CCITT 的 CRC-16 差错校正算法),(见图 2.4)。CRC-16 可以检测所有单字节和双字节差错, 检测率达到所有可能差错的 99.998 %。

SYNC	SFD	Signal	Service	Length	CRC	PSDU
------	-----	--------	---------	--------	-----	------

图 2.4 802.11b PLCP 帧格式

(2) 差错恢复机制

由于干扰和碰撞等发送减损而造成的位差错, 可能会对帧序列产生破坏。如设备 A 发送了 RTS 帧之后, 收不到响应 CTS; 或者, 设备 A 发送了一个数据帧之后, 收不到应答信息。为了解决以上问题, 802.11b 的 MAC 中加入了差错恢复机制。

设备在进行帧交换的同时, 要完成差错恢复任务。工作于 MAC 层的确认帧(ACKnowledgement), 此时能够提供快速的恢复能力。

差错恢复通常包括一段时间间隔。设备无误地接收到一个帧之后, 会马上向发送站返回一个 ACK 帧。如果传输差错破坏了途中的 ACK 帧, 这样就会产生重复帧。一段特定的时间内没有收到 ACK, 发送站将重新发送该帧。这个过程通常称为自动请求重传(ARQ: Automatic Repeat request), 常用于位差错导致 ACK 帧不可识别的情况。IEEE LLC 指定只使用基于 ARQ 的协议控制错误。

3. 接入 EPA 的实时性

1) 分段重发

802.11b 的 MAC 帧头的帧控制字段有多分段字段(more fragment field) 和重发字段(retry field), 提供分段存储和分段重发服务。如果 MSDU 的长度超过了 MAC 管理信息库 (MIS) 中 aFragmentation Threshold 参数的值, MAC 协议就会对 MSDU 进行分段。所有经过分段处理的帧由一个 MAC 头、FCS 和一个表明其在 MSDU 中有序位置的分段号组成。如果同一个 MSDU 还有其它分段存放在后续的帧中, more fragment field 值设为‘1’。对于重发帧, retry field 值设为‘1’, 其它设为‘0’。当传送帧受到严重干扰时, 必定要重传。因此若一个信包越大时, 所需重传的耗费(时间、控制信号、恢复机制)也就越大, 这时, 若减小帧尺寸, 把大信息包分割为若干小信包, 即使重传, 也只是重传一个小信包, 耗费相对小

得多。这样就能大大提高无线设备在噪声干扰地区的实时性。当然，作为一个可选项，可根据干扰的严重程度，设置分段的大小。分段的大小一般在 256—2048 字节之间。

2) 序列控制

802.11b 的 MAC 帧头包含序列控制(sequence control)字段，由序列号(sequence number)字段和分段号(fragment number)字段组成(见图 2.5)。这个字段表明一个特定 MSDU 的序列号和分段号。一个特定 MSDU 的每一个分段都拥有相同的序列号。如果帧的序列号和分段号和先前的帧相同，或者重发位置 1，那么接收站可以判断该帧是一个重发帧。接收站通过监视序列号和分段号来重组数据帧并过滤重复帧，以便加快实时数据的传输。

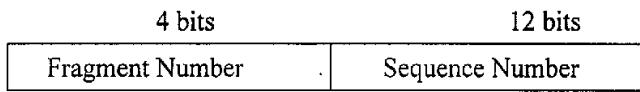


图 2.5 序列控制字段

4. 接入 EPA 的安全性

由于 802.11b 采用公共的电磁波作为载体，因此对越权存取和窃听的行为也更不容易防备。因此，802.11b 接入 EPA 时建议采用如下的安全机制：

- 1) 采用端口访问技术(802.1x)进行控制，防止非授权的非法接入和访问。
- 2) 采用 128 位 WEP 加密技术，并不使用产商自带的 WEP 密钥。
- 3) 对于密度等级高的网络采用 VPN 进行连接。
- 4) 对 WAP 和网卡设置复杂的 SSID，并根据需求确定是否需要漫游来确定是否需要 MAC 绑定。
- 5) 禁止 WAP 向外广播其 SSID。
- 6) 修改缺省的 WAP 密码，如 Intel 的 AP 的默认密码是 Intel。
- 7) 布置 WAP 的时候要在公司办公区域以外进行检查，通过调节 WAP 天线的角度和发射功率防止 WAP 的覆盖范围超出办公区域，同时要让保安人员在公司附近进行巡查，防止外部人员在公司附近接入网络。
- 8) 禁止员工私自安装 WAP，通过笔记本配置无线网卡和无线扫描软件进行扫描。
- 9) 如果网卡支持修改属性需要密码功能，要开启该功能，防止网卡属性被修改。
- 10) 配置设备检查非法进入公司的 2.4G 电磁波发生器，防止被干扰和 DOS
- 11) 制定无线网络管理规定，规定员工不得把网络设置信息告诉公司外部人员，禁止设置点对点的 Ad hoc 网络结构。
- 12) 跟踪无线网络技术，特别是安全技术(如 802.11i 规范了 TKIP 和 AES)，对网络管理人员进行知识培训。

2.4 本章小结

《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》以工业以太网的现场应用为目标，面向控制工程师，思路新颖、起点高、创新性强，填补国内该领域的空白，将成为我国拥有自主知识产权的工业控制网络技术。本章在介绍了《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》中 EPA 通信模型和 EPA 网络设备之间的通信关系的基础上，重点讨论并给出了“EPA 网络中的 802.11b 接入标准”，描述了 EPA 网络中的 802.11b 接入模型，接入参考协议模型中各层的功能，接入通信过程，以及接入过程提供的服务，对接入系统的环境适应性给出了相应解决机制。目前国内外还没有有关控制网络中的 802.11 接入协议方面的报道。

第三章 蓝牙与 802.11b 的共存性

802.11b 和蓝牙两种无线通信技术凭着自身的优势在近几年得到了飞速的发展，推动了无线局域网的广泛应用，特别是两者在工业以太网中的应用正逐渐成为研究的热点，因此，蓝牙技术与 802.11b 技术的协同操作将是发展的必然趋势。

3.1 蓝牙与 802.11b 的共存干扰

3.1.1 蓝牙与 802.11b 的共存模型^[10]

蓝牙与 802.11b 两项技术的共存操作模型概括起来可以分为以下两大类：

1. 非协作式共存设备

(1) 共存设备

蓝牙设备与 802.11b 设备只是共存于距离较近的同一环境下，相互之间没有连接和信息交换，需要共享频谱，如图 3.1 所示：

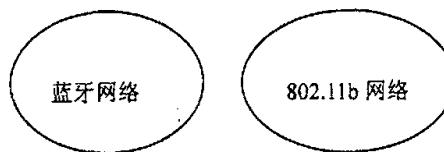


图 3.1 共存设备

(2) 双模设备

该设备有蓝牙和 802.11b 两个通信模块，蓝牙通信模块接入蓝牙网络，802.11b 通信模块接入 802.11b 网络，两个模块之间不进行信息交换，如图 3.2 所示：

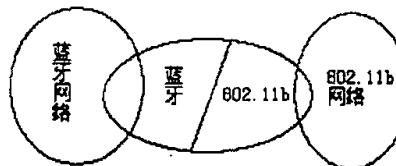


图 3.2 双模设备

2. 协作式共存设备

(1) 切换连接设备

该设备可以在蓝牙和 802.11b 设备之间进行动态切换，存在于两个网络中，既可以与蓝牙网络通信，也可以与 802.11b 网络通信，但不能同时进行，如图 3.3 所示。

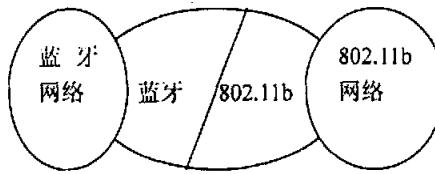


图 3.3 切换连接设备

(2) 桥接设备

该设备也存在于两个网络中，可以与蓝牙网络和 802.11b 网络同时进行通信，如图 3.4 所示。

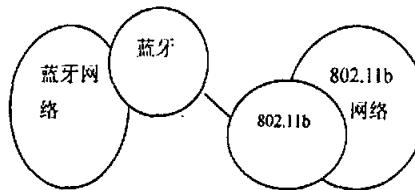


图 3.4 桥接设备

3.1.2 蓝牙与 802.11b 相互干扰^[11]

前面提到蓝牙与 802.11b 都可以应用于工业以太网中，并分析了两者的共存操作模式，但是由于两者都工作在 2.4GHz 的 ISM 频段，当这两种类型的信号在同一环境中存在时，蓝牙和 802.11b 将互相干扰。其干扰主要与两者的射频传输特性有关。

1. 蓝牙跳频

蓝牙信息传输是在信道上通过分组进行的，每个分组在不同的跳频频率上进行发送。信道表示为在 79 或 23 个（我国通常选用 79 跳，本论文规定蓝牙为 79 跳系统）射频信道上跳变的伪随机跳频序列，每个微微网的跳频序列是唯一的，由主设备的蓝牙设备地址决定，跳频序列的相位由主设备的蓝牙时钟决定。

79 跳的蓝牙跳频系统有 5 类跳频序列：寻呼跳频序列，寻呼响应序列，查询序列，查询响应序列，信道跳频序列。其中信道跳频序列有一个非常长的时期，在短时间内没有重复，该序列均匀分布在 79MHz 跳频频率上。

蓝牙跳频选择方案由两部分组成：

- 选择一个序列；
- 在跳频频率上映射该序列。

(1) 序列选择

跳频选择方案的一般框图如图 3.5 所示：

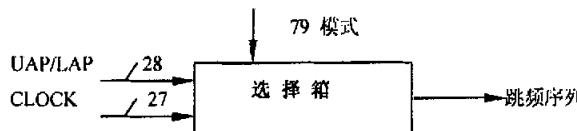


图 3.5 跳频选择方案的一般框图

从输入到特定的跳频序列的产生在选择箱内完成。基本上，输入是本地时钟和当前地址。在连接状态下，本地时钟 (CLKN) 是主时钟 (CLK) 加一个偏移，只使用时钟的 27 个 MSBs。在寻呼和查询状态下，时钟的整个 28bit 都要使用。然而，在寻呼状态下，本地时钟将被修改为主设备对寻呼设备的估算值。

地址输入由 28bit 组成，即整个 LAP 和 UAP 的 4 位 LSB。在连接状态里，使用主设备的地址。在寻呼状态下使用寻呼设备地址。当为查询状态时，使用和 GIAC 对应的 UAP/LAP。输出由一个伪随机序列构成，本系统输出一个 79 跳伪随机序列。

对于 79 跳系统，选择方式选择一个 32 跳频率的分段 (占 64MHz 带宽)，并以随机次序访问这些跳频点。接下来再选择另外的 32 跳频段，依次进行。对于寻呼和寻呼响应状态，总是使用相同的 32 跳段 (该段由地址选择，不同的设备将有不同的寻呼段)。在连接状态下，输出由在 79 跳里变动的伪随机序列构成，如图 3.6 所示。

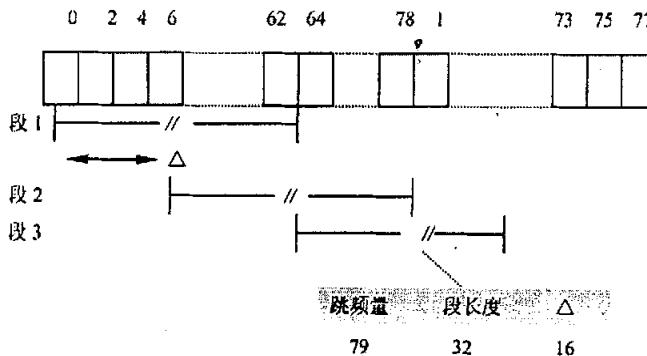


图 3.6 连接状态下的跳频选择方案

(2) 跳频频率映射^[12]

79 跳系统的跳频选择内核如图 3.7 所示。X 输入决定了 32 跳频段中的相位，Y1 和 Y2 用于选择主到从或从到主。输入 A 到 D 决定了段内顺序，输入 E 到 F 决定了到跳频频率的映射。内核编址含有跳频频率的寄存器。产生一个跳频序列表，先是所有偶数跳频频率，然后是所有奇数跳频频率。

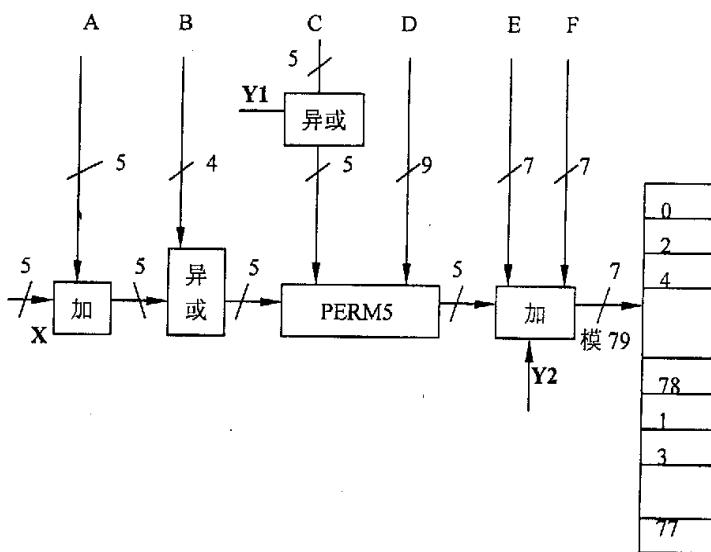


图 3.7 79 跳频系统跳频选择内核框图

经过上面序列选择和频率映射后, 就可得到蓝牙通信连接中的跳频频率图, 如图 3.8 所示。

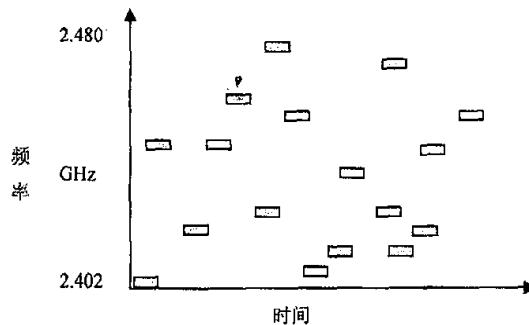


图 3.8 蓝牙频率占用图

每一小矩形条代表一次蓝牙传输, 图 3.8 表示分组长度为一个时隙的蓝牙传输。

2. 802.11b 扩频^[13]

每一个 Wi-Fi 网络始终保持相同的频率占用, 使用 2.4G—2.4835G 中的一段信道。IEEE802.11b 标准规定 11 个可能被使用的信道。每一信道均根据其中心频率定义。中心频率相互间隔为 5MHz。相关信道从 1 到 11 进行编号。

由于 IEEE802.11b 信号的 20dB 衰减依然有 16MHz 宽, 因此在相同位置使用相邻信道 (间隔为 5MHz) 会导致干扰。出于这个原因, 位于相同位置的 Wi-Fi 网络通常是在 1、6 及 11 号信道运行, 以防止干扰。在此情况下, 三个位于相同位置的网络大约将在 ISM 频带占用带宽 83.5MHz 的 $3 \times 16\text{MHz} = 48\text{MHz}$ 。

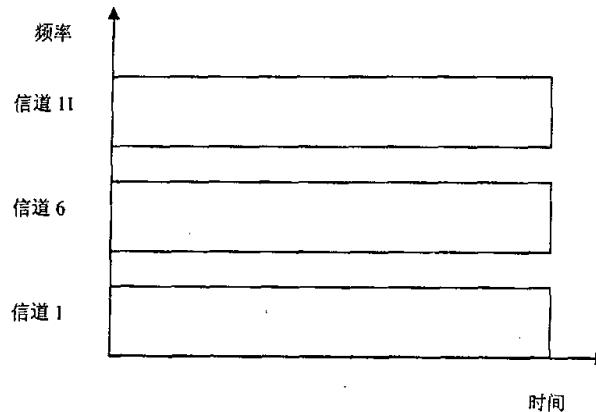


图 3.9 三个 Wi-Fi 网络的频率占用图

图 3.9 说明了三个 Wi-Fi 网络的典型频率占用。每一个 Wi-Fi 网络独占一个信道。图中显示了在 1、6 和 11 号信道运行的网络。每一 Wi-Fi 数据包的时长随数据包中数据量而变化。在网络上每一个数据包之后一般跟随一个短的确认数据包。

3. 蓝牙与 802.11b 相互干扰^{[14], [15], [16], [17]}

由于蓝牙与 802.11b 都工作在非授权的 2.4GHz 频段，802.11b 标准采用直接序列、具有 11Mbps 原始位速率的扩频信令形式，理论上数据有效载荷为 6.25Mbps，净数据有效载荷为 5.15Mbps。为了保持同样的误码率，当与接入点的距离加大时，802.11b 信号的数据率明显增加。站点与接入点的距离越远，信号越容易受到干扰。当 802.11b 发射机没有接收到目标系统发出的确认信息包已到达的信号时，它将再次发送数据包。

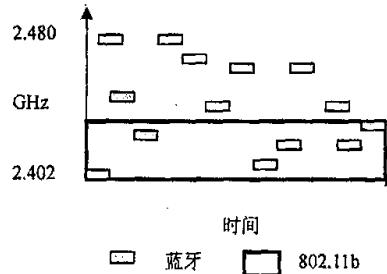


图 3.10 蓝牙与 802.11b 共存时的频率冲突示意图。

而蓝牙则采用跳频扩频信令形式，带宽为 1Mbps。它在 1 MHz 宽的 79 个信道频谱上大约每秒连续跳越 1,600 次。本质上，蓝牙经常从频谱中不同的点跳到 802.11b 信号上，干扰 802.11b 信号，并阻止信息包的发送。当信息包被“破坏”后，发射系统因不能收到确认信息，就会重新发送，这就导致信息吞吐量的下降。如果 802.11b 信号特别弱，而蓝牙信号又特别强，802.11b 信号上的噪音可能会

上升到使连接中断的程度。图 3.10 为蓝牙与 802.11b 共存时的频率冲突示意图，假设只有一个 802.11b 网络，且占用 0—22 个信道。

它们之间的干扰级别受几种因素的影响：蓝牙与 802.11b 设备间的距离，流经两种无线网络的数据流量，不同设备的功率级别，802.11b 数据传输率。而且网络传输的不同信息类型对干扰的灵敏度不同。例如，语音链路比数据类型的传输链路对干扰的灵敏性更高。

为了使说明更明确，这里以图 3.11 中的情况为例，讨论 802.11b 无线局域网和蓝牙这两种系统之间的相互干扰。图中所示的无线局域网接入点和工作站都是基于 802.11b 的无线局域网单元，同时假设图中的蓝牙单元为 79 个跳频点的蓝牙单元。由于它们都使用 2.4GHz 的频段，在一定范围内，无线局域网单元之间和蓝牙单元之间的通信，相互之间都会存在干扰。

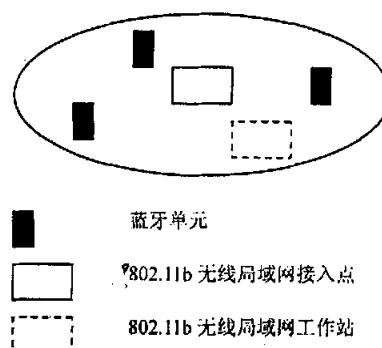


图 3.11 802.11b 和蓝牙共存系统

802.11b 使用 CCK 的调制方式，这是一种扩频的通信手段。对于基带信号进行 CCK 调制以后，便获得了 11Mbps 的数据速率，在经过中频调制和射频调制，最终信号被调制到 2.4GHz 的 ISM 频段，占用带宽 22MHz。

蓝牙使用的是跳频的通信方式，每一个信道使用一种跳频序列，该跳频序列由 79 个射频的跳频点构成。对于 79 个跳频点构成的跳频序列，射频的跳频点选自 2.402GHz 到 2.480GHz 中的间隔为 1MHz 的频率点。

由上面的描述不难看出，两种通信方式使用的频带显然有重合的部分，当蓝牙单元的跳频点进入 802.11b 无线局域网的工作频段范围，这就不可避免地带来了干扰，主要表现在以下两个方面：

蓝牙技术支持两种连接方式：面向连接（SCO）方式，主要用于语音传输；无连接（ACL）方式，主要用于分组数据传输。每次通信开始首先由主单元初始化连接程序，主从单元之间信息的发送接收都是根据主单元的时钟来进行的。由于蓝牙单元的跳频速率为 1600 跳 / 秒，所以一个时隙至少为 625μs，当蓝牙单元的跳频点与 802.11b 无线局域网所使用的频率发生重合，而且蓝牙系统的数据

包与无线局域网的数据包在时序上发生碰撞时，两者的信号都会成为另一方的噪声，这样就造成更多的误码出现，使得蓝牙系统和 802.11b 无线局域网的通信系统性能都会受到一定的影响。尤其对于蓝牙中语音通信的情况，为了保证语音通信的有效性，蓝牙协议中规定，对于语音通信的数据包是不进行差错校验和重传的，因此，如果信道的环境较差的时候，蓝牙系统语音的通信质量就会受到更大的影响。

另外，802.11b 无线局域网使用的介质访问控制（MAC）协议，是基于载波侦听多路检测 / 冲突避免的 CSMA / CA，即当 802.11b 无线局域网中的单元要发送信息以前，都要对无线信道中的能量进行探测，当无线信道中的能量大于某个阈值的时候，就随机后退（back-off）若干个时隙，再重新进行发送。在实际的系统中通常使用 CSMA / CA + ACK + RTS / CTS 来确保系统性能，这种方式是要在完成信道的检测以后，负责发送的无线局域网单元在发送数据以前都要发送一个请求发送（RTS）帧，收到对方的清除发送（CTS）帧以后才会发送数据，在发送数据过程中也要每一次的发送都得到对方接收无误的确认 ACK 以后才会继续发送数据，这就是所说的四次握手过程，具体过程如图 3.12 所示。这样以来，如果 802.11b 无线局域网中的单元进行检测的时刻与蓝牙单元的跳频点出现的时刻相遇，而检测的结果又需要该单元进行重传，或者传递的数据包受到影响没有正确到达而要重传，则就会影响到整个 802.11b 系统的数据传输速率和吞吐量。

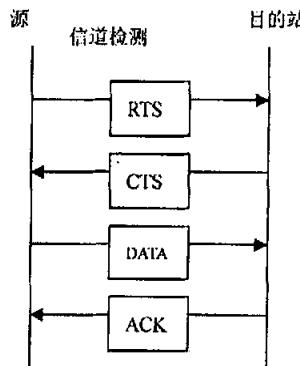


图 3.12 802.11b 无线局域网单元的工作过程

因此，蓝牙与 802.11b 这两个系统共存时，就会彼此影响到对方的性能，这种影响主要与蓝牙单元和 802.11b 无线局域网单元的布局、密度、发射功率及所处的环境等因素有很大关系，了解这两种系统之间相互干扰的特性，就是为了能找到克服它的办法，下面将讨论解决这种干扰的几种方法。

3.2 解决共存的几种关键机制^{[18], [19]}

蓝牙与 802.11b 的共存机制有两种类型，协作式和非协作式。协作式的共存机制可以使两种无线网络互换信息，也就是协作式共存机制要求蓝牙与 802.11b 之间可以进行通信；非协作式共存机制不能使两种无线网络互换信息。这两种类型的共存机制都可以减弱蓝牙设备与 802.11b 之间的干扰。所有协作式共存机制用于至少一个 802.11b 站点和蓝牙设备共存于一个物理单元的情况。这时，需要在共存于一个单元内的蓝牙和 802.11b 设备之间建立一条通信链路。非协作式共存机制用于蓝牙和 802.11b 设备之间不需要建立通信的情况。表 3.1 是对这两种共存机制的描述。

表 3.1 蓝牙与 802.11b 共存机制

名称	类型
时分多址 (TDMA)	协作式
分组业务判决	协作式
自适应干扰抑制	非协作式
自适应分组选择	非协作式
ACL 链路的自适应时序安排	非协作式
SCO 链路的自适应时序安排	非协作式
自适应跳频	非协作式

3.2.1 协作式共存机制

协作式共存机制提供的共存机制可以使蓝牙和 802.11b 共享信息，这些机制可以和没有使用共存机制的原始设备进行互操作。

协作式共存机制有两种操作模式，模式的采用依赖于网络拓扑和支持的通信。第一种模式，支持蓝牙的 SCO 和 ACL 通信，SCO 通信在时序上的传输优先级比 ACL 通信高。第二种模式基于时分多址，并且用于高密度微网中存在 ACL 通信的时候。在时分多址 (TDMA) 模式下，802.11b 信标与信标之间的间隔再细分成两个子区间：一个子区间用于 802.11b，另一个用于蓝牙。由于每个射频通信都有自己的子区间，两种无线设备可以很好的进行正交操作。该技术需要在主设备传输时，附加一个特性进行限制。这种模式是通过 AP 管理软件选用的，无效频率和这种模式联合使用可以进一步减少干扰。

时分多址 (TDMA) 和分组业务判决 (PTA) 可以结合使用形成一个更好的共存机制。当有必要把 802.11b 和蓝牙设备共同配置在一个相同的物理单元内时，推荐使用 TDMA 或 PTA 协作式共存机制。如果使用的是 PTA 机制，可以和确定

性干扰抑制机制相结合, 以提高蓝牙和 802.11b 的共存性。

如果在同一环境中配置有蓝牙和 802.11b 的物理单元密度较高 (半径 10 米的圆周范围内有三个或三个以上这样的物理单元) 并且没有蓝牙 SCO 链路 (语音链路), 这时建议使用 TDMA 机制。如果密度较低 (半径 10 米的圆周范围内不到三个这样的物理单元) 或者使用了蓝牙 SCO 链路, 这时推荐使用与确定性干扰抑制相结合的 PTA 机制。

3. 2. 2 非协作式共存机制

802.11b 自适应干扰抑制, 自适应分组选择, ACL 链路的分组时序安排, SCO 链路的分组时序安排和自适应跳频都可以提高蓝牙和 802.11b 网络性能。这些方法不需要蓝牙和 802.11b 设备之间进行协作, 因此, 它们属于非协作式共存机制一类。

自适应分组选择和时序安排方法的关键是根据信道条件进行自适应传输。例如, 如果蓝牙信道受到 802.11b 网络的干扰, PER 主要是由于蓝牙和 802.11b 系统之间的冲突产生的, 而不是由于噪声产生的 bit 错误。如果与时序安排结合, 没有前向纠错 (FEC) 保护的分组类型将提供更好的吞吐量。这种类型的共存方法的有效性的基础是能够准确及时地指示当前信道的条件。信道评估方法有: 接收信号强度指示 (RSSI), 头错误检测 (HEC), bit 错误率 (BER) 和 PER, 以及这几种方法的结合。

这里一共有五种非协作式共存机制, 其中至少有两种都使用信道分类, 可以把这五种机制归纳为三种类型:

- a) 自适应干扰抑制。这是一种对 802.11b 物理层独自进行信号处理的机制。
- b) 自适应分组选择和时序安排。蓝牙系统使用多种不同的分组类型, 这些分组是根据不同的结构进行分类的, 例如分组长度和使用的错误保护级别。根据即将使用的跳频所处的信道条件选择最好的分组类型, 可得到更好的数据吞吐量和网络性能。对分组传输进行仔细的时序安排, 以便蓝牙设备在 802.11b 频率带外的跳频传输, 并且限制带内传输, 就可以避免或最小化蓝牙对 802.11b 的干扰, 同时提高蓝牙系统的吞吐量。
- c) 自适应跳频 (AFH)。蓝牙系统在 79 个信道进行跳频, 连接状态的标称速率是 1600 跳 / 秒, 查询和寻呼状态的标称速率是 3200 跳 / 秒。通过识别干扰信道, AFH 可以改变跳频序列以避免这些受干扰信道 ('坏' 信道)。根据通信类型和信道条件产生一个分段序列, 作为频率再映射的输入, 最后改变跳频序列避免或最小化干扰的影响。

当不需要把蓝牙和 802.11b 设备共同配置在一个物理单元内时, 就只需使用非协作式共存机制。但是在一定范围内一种非协作式共存机制可能达不到需要的

效果。例如，当一个 802.11b 系统和一个蓝牙系统相隔 30 厘米时，蓝牙信号将远远超过 802.11b 系统的检测门限，即使是在 802.11b 频带外。因此，依赖信道评估和干扰检测的非协作式共存机制将不能阻止这种近距离状态下的干扰。

从自适应跳频到分组时序安排和业务控制的非协作式共存机制都使用相似的技术检测频带内其他设备的存在，比如检测分组或帧格式错误率，信号强度或信干比（通常使用 RSSI）。例如，每一个设备都可以在每个使用的频率上维持帧错误的检测。跳频设备因此可以推断出哪个频率被该频段内的其他设备占用，并改变它当前的跳频模式。如果推断出该频率已被占用，甚至可以选择不在该频率上传输。

MAC 子层分组选择机制考虑封装规则，使用不同长度的蓝牙分组以避免蓝牙和 802.11b 之间的频率交叠，即，蓝牙时序安排机制知道使用合适长度的分组（1, 3 或 5 时隙）以跳开所谓的‘坏’频率。

这些机制可以单独使用也可以联合使用。自适应干扰抑制可以和上面的所有机制结合，因为它运行于物理层，也可以单独使用。

自适应跳频已被纳入蓝牙标准 1.2 版本，只是对蓝牙 1.1 版本作适当的改进。它是在常规蓝牙跳频基础上发展起来的一项技术，只需对常规蓝牙跳频内核作简单改变就能实现，并且不需要对 802.11b 作任何改变。自适应跳频能使跳频通信自动避开被干扰的频点，并以最小的发射功率和最低的被截获概率保持良好的通信性能。图 3.13 为采用 AFH 的蓝牙与 802.11b 冲突避免示意图。

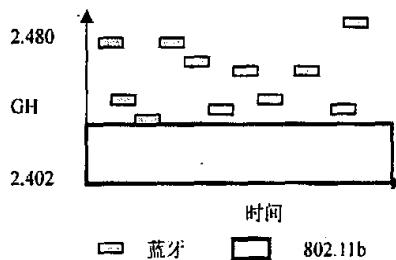


图 3.13 采用 AFH 的蓝牙与 802.11b 冲突避免示意图。

因此，在蓝牙和 802.11b 共存环境下，将自适应跳频技术应用于蓝牙通信中，可以使蓝牙跳频信道自动避开已被 802.11b 占用的信道，减小频率干扰冲突，这样必将提高蓝牙的抗干扰性能，提高 802.11b 系统性能，有效解决与 802.11b 的干扰问题。

这种非协作式共存机制由于实现较简单，全球很多大公司已把自适应跳频作为解决蓝牙和 802.11b 共存干扰的非协作式机制，因此，自适应跳频机制将作为这两种无线系统共存的主流解决机制，得到广泛的应用。

3.3 本章小结

由于工业控制网络对无线通信技术的需求, 802.11b 和蓝牙将在工控网络中得到广泛应用, 随之而来的问题就是 802.11b 和蓝牙的共存问题。本章首先介绍了蓝牙跳频特性和 802.11b 扩频特性, 根据两者在 2.4GHz ISM 频段的射频特性分析两者共存的相互干扰, 在此基础上简单介绍了 802.15.2 共存委员会总结的几种共存机制, 对比了协作式共存机制和非协作式共存机制的特点, 并提出本文所采用的共存机制——自适应跳频。

第四章 非协作共存机制——自适应跳频 (AFH)

自适应跳频(AFH: Adaptive Frequency Hopping)技术由美国 Bandspeed 公司与 Open Interface 公司联合开发研究。这种技术通过将蓝牙跳频范围限定在原来的 $1/3 \sim 1/4$ ，防止了与无线 LAN(IEEE802.11b)使用带宽的重叠，从而降低了无线 LAN 与蓝牙之间的电波干扰。目前自适应跳频也是研究较多的一种非协作式共存机制，随着蓝牙规范 1.2 版本的推出，包含有 AFH 机制的蓝牙设备将得到广泛应用，并且这种蓝牙设备与规则蓝牙跳频设备是兼容的。这一章在介绍了自适应跳频基本原理和关键技术的基础上，结合蓝牙特性，设计了两种信道评估分类方法。

4.1 自适应跳频基本原理^{[20], [21], [22]}

4.1.1 定义

自适应跳频通信是指除了常规跳频通信所必须具备的功能外，还必须具有频率自适应控制和功率自适应控制。所谓频率自适应控制是在跳频通信过程中，拒绝使用那些曾经使用过但是传输不成功的跳频频率集中的频点，即实时去除跳频频率集中被干扰的频点，使跳频通信在无干扰的可使用的频点上进行，从而大大提高跳频通信中接收信号的质量。所谓功率自适应控制，是指自适应跳频系统中，各站台相互以最小的发射功率获得可靠的通信，以达到尽可能增加系统的隐蔽性。为了实现频率和功率自适应控制，自适应跳频通信系统中各个站台必须具有接收信道质量实时评估部件和反向通信链路，以便实时测定信道接收功率大小和信道受干扰的情况，并用有关的自适应控制协议，通过反向链路及时通知发送站，调整发送站发射机功率，使收发双方同时从跳频频率集中除去受干扰的跳频点。

4.1.2 系统结构及功能

图 4.1 给出了自适应跳频系统单端设备结构示意图。在自适应跳频系统单端设备中，核心部件是发送和接收自适应跳频控制单元。它与常规跳频控制单元的区别是：具有一个实时信道质量评估单元和利用自适应跳频图案发生器代替常规的跳频图案发生器。

在发送自适应跳频控制单元中，发送数据处理单元主要完成同步信息、通信信令和信息数据的综合；发送自适应跳频图案发生器主要产生发送跳频图案，也包括根据反馈信道接收到的信令及时去除被干扰的跳频频率点。在接收自适应跳

频控制单元中，同步单元主要完成数据时钟同步、帧同步和跳频图案同步；实时信道质量评估单元主要根据接收信号的质量和一定的准则判定信道的好坏，从而发出指令，去除受干扰的跳频频率点，调整接收跳频图案，同时根据最低被截获概率，发出指令调整发送方的发射功率电平；接收数据处理单元完成信令信息和信息数据的分离和信令数据的处理，同时组织反馈信令发送。另外，根据收到的信令数据实时同步调整发送跳频图案，使之与接收方同时从跳频频率集中去除受干扰的跳频频率点。与此同时把收到的自适应功率控制指令，通过发送数据处理单元，去控制发射机的输出功率电平。自适应跳频系统的原理框图如图 4.2。

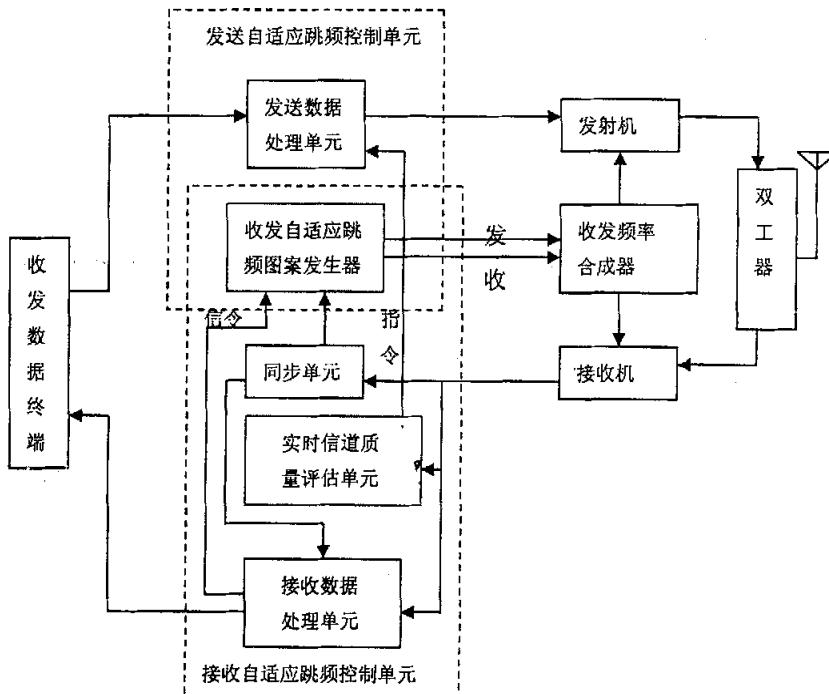


图 4.1 自适应跳频系统单端设备结构示意图

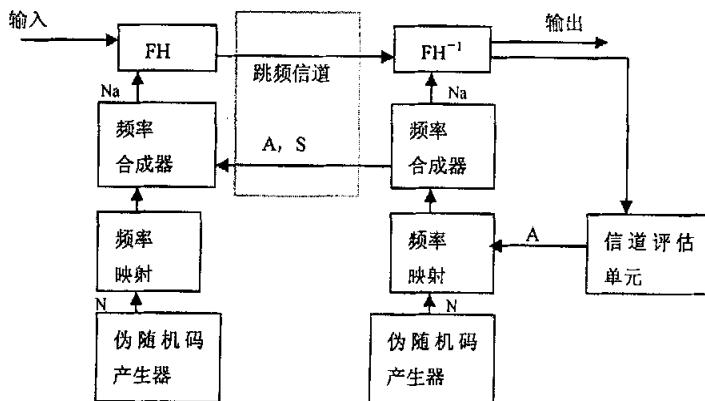


图 4.2 AFH 系统原理框图

4.2 自适应跳频关键技术^{[23], [24], [25]}

自适应跳频通信中, 其关键技术有实时信道评估技术, 频率自适应控制技术, 功率自适应控制技术, 自适应跳频信令及其传输协议等。下面将进行简要论述。

4.2.1 信道质量评估技术

实时信道质量评估是根据跳频信道实时接收信号, 使用实时信道质量判决准则, 来分析判断跳频信道的质量, 从而确定该跳频频点的接收功率强弱, 是否受到干扰和能否进行正常的通信等等。这些实时评估结果为进行功率自适应控制和频率自适应控制提供依据。如图 4.2 所示的 AFH 系统原理框图, 信道质量评估主要是为频率自适应控制和功率自适应控制提供控制依据。信道评估单元既是一个连接质量分析器 (LQA, Linking Quality Analyzer), 它根据接收信号测量信道的干扰情况, 并从中选出最低干扰电平的 N_a 个可用信道的频率集 A , 根据功率控制准则为每个可用信道指定所需的功率电平 S 。 A, S 通过反向反馈信道传到发送端并得到执行, 直到下一个 A, S 到来。

信道质量评估的准则通常为误码率, 因为它直接反映了信道中传输信号的质量。将误码率的门限设为 P_f , 如果某信道的误码率大于 P_f , 则认为信道被干扰, 将其从频率集中去除。此门限的选择在通信过程的不同阶段可以不同。

4.2.2 频率自适应控制

基于实时信道质量评估的频率自适应控制技术的核心是要实现从跳频频率集中去除被干扰的坏频点, 实现收发双方在无干扰的频率集上同步跳频。首先是利用好频点来更新那些已被干扰的坏频点, 其次要保持在跳频过程中均匀更新后的跳频频率集中的每个频点。

4.2.3 功率自适应控制

功率自适应控制的策略是将有限的发射功率资源最优化地分配到各个使用的信道, 使得各个信道都能以最小的发射功率实现正常通信, 从而提高跳频信号的隐蔽性和抗截获能力。

功率自适应控制算法的原则有两种: 一种是等信干比 (SISIR) 原则。它调整各个跳频信道的平均功率, 使得它们的信干比相等; 另一种原则是误码率最小原则, 它的主要目的在于保证良好的通信性能, 将误码率降到最小。

4.3 自适应跳频在蓝牙中的应用^{[26], [27], [28], [29]}

自适应跳频应用于蓝牙技术中可避免与 IEEE802.11b 之间的冲突，解决其干扰问题。由前面的介绍可知，将自适应跳频引入蓝牙技术有几个关键技术需要解决，需要对蓝牙现有的规范进行改进，主要体现在以下几个方面：信道评估算法、链路控制信息、跳频产生核心的改进以及优良信道的维护。

自适应跳频（AFH）是一种非协作性的共存机制，通过频率智能选择和无干扰信道跳频来避免蓝牙设备与其它工作在 ISM 频带的设备之间的干扰。该机制被分为以下四个部分：

- 设备识别和机制建立，
- 信道分类，
- 信道分类信息互换，
- 自适应跳频机制

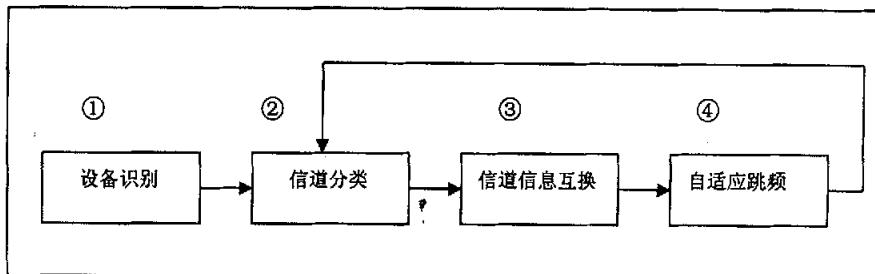


图 4.3 自适应跳频概图

下面将分别介绍图 4.3 中的第②步和第④步，并且针对蓝牙技术特性，给出并讨论了两种信道分类的方法。

4.3.1 信道评估分类方法设计

信道质量评估的准则通常为误码率，因为它直接反映了信道中传输信号的质量。将误码率的门限设为 P_f ，如果某信道的误码率大于 P_f ，则认为信道被干扰，将其从频率集中去除。此门限的选择在通信过程的不同阶段可以不同。

在测定误码率时往往利用帧头中的固定比特位进行测量，这样可以节省额外开销，也可以利用接收端的信干比（SIR）作为评估准则。下面将分别给出这两种不同的信道评估方法：分组丢失率方法和基于 BER 的信道评估方法。

1. 分组丢失率

我们已知在信道上，蓝牙消息是通过分组进行交换，每个分组在不同的跳频频率上进行发送，信道分成时隙，每个时隙对应一个射频频率，信道从 0 到 78，分别对应 2.4GHz 频率上的一个跳频频率。信道的‘好’/‘坏’与该信道上传

输的蓝牙分组的接收正确性有关。因此，通过判决每个接收到的分组的丢失率可以确定该信道的好坏。每个分组至少包含一个接入码和一个分组头，如图 4.4 所示。

接入码	分组头	净荷
-----	-----	----

图 4.4 标准分组格式

接入码标志在微微网的信道上交换的所有分组，即所有在同一微微网中发送的分组使用相同的信道接入码。在蓝牙的接收机设备中，使用一个滑动相关器对接入码进行相关处理，当超过门限值时就产生一个触发信号，触发信号被用于判定接收定时。每个分组头都有一个 HEC 用于对分组头的完整性进行校验。

分组接收失败是因为：接入码相关器失败，HEC 较验失败，或一个有净荷分组的 CRC 失败。因此可以使用信道接入码、分组头的 HEC 较验和净荷的 CRC 较验检测分组内信息的错误和分组的发送错误。在接收分组时，首先检测接入码，即检测 LAP 是否正确。HEC 和 CRC 用于检测信息错误和地址错误，UAP 一般包括在 HEC 和 CRC 检测中。即使一个分组通过了 LAP 检测，但 UAP 检测没有通过，那么在 HEC 和 CRC 检测后将被丢弃。

通过上面的一系列检测，就可判断每个信道接收到的分组的正确性。为了保证判断的准确性，可以对每个信道的接收分组进行多次测量，计算出每个信道接收分组的错误率，最后形成一张每个信道的分组丢失率 (PLR) 表。表 4.1 是对主设备的每个接收信道进行 100 个分组测量得到的 PLR，先是偶数跳频信道，后是奇数跳频信道。

表 4.1 通过分组丢失率进行每个信道分类

	信道 0	信道 2	…	信道 77
接入码相关性失败	58	65	…	2
HEC 失败	0	0	…	0
CRC 失败	8	8	…	0
总的分组丢失数	66	73	…	2
总的分组数	100	100	…	100
平均分组丢失率 (PLR)	66 %	73 %	…	2 %
门限值 ($Thresh_{PLR}$)	15 %	15 %	…	15 %
信道分类	bad (0)	bad (0)	…	good (1)

分类测量过程结束后，如果 PLR 超过系统规定的门限值 ($Thresh_{PLR}$)，信道分类为“坏”信道，‘坏’信道用数字‘0’表示，‘好’信道用数字‘1’表示，门限值由商家规定。

同样，从设备也要通过接收分组评估信道分类，通过同样的方法，从设备可评估分组丢失率，并应用门限值生成分类列表。

通过主从设备的信道分类以后，需要收集所有主从设备的分类信息，主设备通过 LMP 指令收集所有从设备的分类信息，如下所示，并与自己的信道分类一起进行统计分析，才能最后得到一个蓝牙微微网的信道分类列表。如表 4.2 所示，假设一个微微网有 7 个从设备。

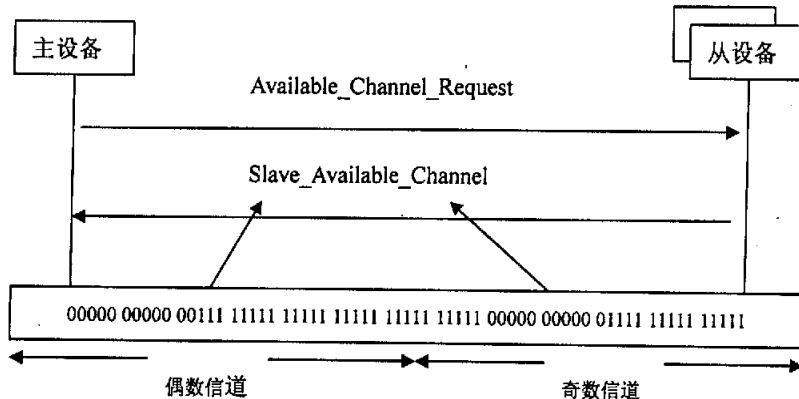


表 4.2 信道分类表

	信道 0	信道 2	...	信道 77
信道分类: 主设备	0	0	...	1
信道分类: 从设备 1	0	0	...	1
信道分类: 从设备 2	0	0	...	1
信道分类: 从设备 3	0	0	...	1
信道分类: 从设备 4	0	0	...	1
信道分类: 从设备 5	0	1	...	1
信道分类: 从设备 6	0	0	...	1
信道分类: 从设备 7	0	0	...	1
Voting score	0	1	...	8
Pass mark	7	7	...	7
pass=1, no pass=0	0	0	...	1

'pass mark' 值与从设备数有关，这里假设从设备数为 7。

表 4.2 中灰色栏中的数字‘1’和‘0’就分别代表信道 0 到 78 的信道好坏。每一个设备都可以在每个使用的频率上维持帧错误的检测。跳频设备因此可以推断出哪个频率被该频段内的其他设备占用，并改变它当前的跳频模式。如果推断出该频率已被占用，甚至可以选择不在该频率上传输。

2. 基于蓝牙 BER 的信道评估技术

误码率的测量也可以通过测量接收端的信干比来计算。下面主要给出了利用信干比计算蓝牙误码率 BER 来进行信道评估的方法。计算出误码率 BER，利用门限误码率 P_f 进行信道质量评估判决。因此，测定 802.11b 和蓝牙分组在互扰环境中的蓝牙 BER 值是关键。

当蓝牙和干扰分组在时间或频率上交叠时, 将产生干扰冲突。该冲突在蓝牙接收端以信干比 SIR (Signal-to-Interference ratio) 的形式测得, BER 值可以根据发射信号的调制方式由 SIR 计算得出。

SIR 依赖于发射功率, 传输距离和使用的路径丢失模式。SIR 值是接收端信号功率与接收端干扰功率的比值。

- 接收端信号功率与期望的信号发射功率, 路径丢失 (距离) 有关;
- 接收端干扰功率与干扰发射功率, 路径丢失 (干扰距离) 和频谱因素 (TX 调制类型, RX 调制类型, 频率偏移) 有关。干扰发射功率是干扰源的传输功率。

因此, 在计算 BER 前需要确定以下传输参数:

表 4.3 传输参数

字段	描述
源端位置	用直角坐标系定义的设备位置
目的端位置	
调制类型	发射机的调制类型 802.15.1 (蓝牙) :GFSK
发射功率	发射功率
频率	传输的中心频率

期望信号经过路径丢失的削弱得到接收端的信号功率, 干扰信号经过接收方路径丢失的削弱并要受到包含收发调制模式和频率偏移在内的频谱因素的联合影响得到接收端干扰功率。

如果蓝牙和 802.11b 在同一地点同一时间运行, 它们将会相互干扰, 特别是当这两个系统的传输频率交叠时, 更会产生带内噪声。在下面的环境中, 蓝牙和 802.11b 之间会产生干扰:

- 发射一个 802.11b 信号给 802.11b 接收端, 同时 802.11b 接收端监听到一个蓝牙信号。如果蓝牙信号在 802.11b 接收端的 22MHz 的传输频带内时, 干扰最大;
- 发射一个蓝牙信号给蓝牙接收端, 同时蓝牙接收端监听到一个 802.11b 信号。如果 802.11b 信号在蓝牙接收端的传输频带内时, 干扰最大;

因此, 当计算蓝牙的 BER 时, 频谱因素中的 TX 调制类型是干扰发射源 802.11b 的调制类型, RX 调制类型是期望接收到的信号蓝牙的调制类型, 频率偏移是干扰信号 802.11b 和期望信号蓝牙的中心频率之间的偏差。图 4.5 描述了蓝牙中心频率对 802.11b 的频率偏移示意图:

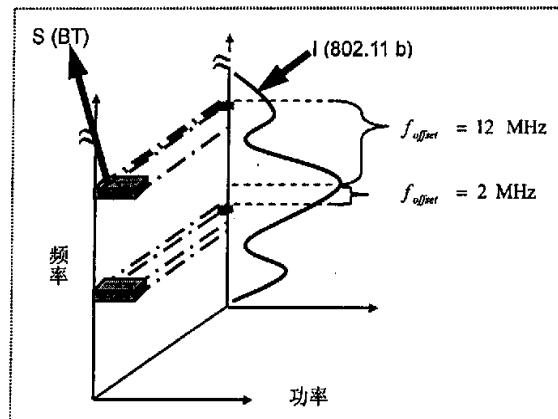


图 4.5 频率偏移示意图

表 4.4 蓝牙频谱因素值^[30]

干扰发射信号	期望接收信号	频率偏移 (d) in MHz			
		1	2	3	其他
802.11b	蓝牙	8.0433E-2	1.0794E-03	1.0079E-03, $d \leq 11$	1.7943E-05, $d > 11$

基于以上分析，通过图 4.6 可以看出蓝牙 BER 的整个计算过程：

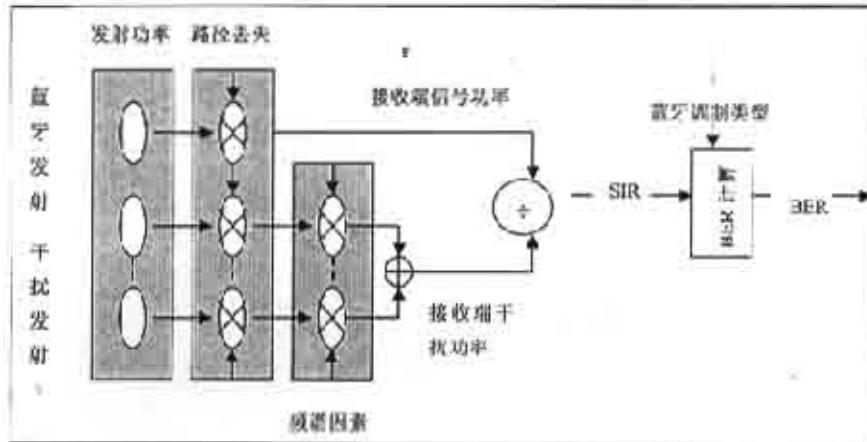


图 4.6 BER 计算过程模式图

接收功率 P_R 和 SIR 依赖于拓扑结构和设备参数：

$$P_R = P_T - L_p \quad (4.1)$$

其中 P_T 为发射功率(蓝牙发射功率或干扰发射功率)，单位为 dBmW，式(4.1)用于计算接收功率，不依赖调制方式。

路径丢失由公式 (4.2) 定义^[31]：

$$L_p = \begin{cases} 40.2 + 20\log(d) & 0.5 < d < 8m \\ 58.5 + 33\log(d/8) & d \geq 8m \end{cases} \quad (4.2)$$

其中 d 是距离 (米), 干扰距离是干扰源和接收端之间的距离。

发送端、信道和接收端都由复杂的基带负责执行。由于蓝牙信号大约占用 1MHz 带宽, 它可以调制到大约 22MHz, 足够覆盖 802.11b 信号的 11MHz 带宽。因此, 接收端将会接收到发射功率和干扰功率。对于一个完整的信道模式, 接收端抽样信号必须加上噪声。假设一个固定的发射功率, 并且没有干扰, 利用式(4.1)和式(4.2)可以计算出一个给定距离的接收信号功率。信噪比 SNR (Signal-to-Noise Ratios), dB 为:

$$SNR = P_R - S_R \quad (4.3)$$

S_R 是接收端的灵敏度 (dBmW)。

类似于 SNR, 可以这样定义信干比 SIR, dB:

$$SIR = P_{RS} - P_{RI} \quad (4.4)$$

P_{RS} 是接收端信号功率, P_{RI} 是接收端干扰功率。如果没有干扰存在, 蓝牙系统的 BER 几乎可以忽略。但是如果受到其他系统的干扰, SIR 将不能够提供一个合理的 BER, 即 BER 可能超出一定的门限值。

基于蓝牙 GFSK 调制方法, BER 计算如下^[32]:

$$BER_{\text{蓝牙}} = 0.5 \times \exp(-SNIR/2) \quad (4.5)$$

其中 $SNIR = P_{RS} - S_R - P_{RI}$, 是接收端信号功率与总的干扰和噪声功率的比值。在这种计算模式中, 如果不考虑接收端噪声功率, 则 $SNIR = P_{RS} - P_{RI} = SIR$ 。即 $BER_{\text{蓝牙}} = 0.5 \times \exp(-SIR/2)$ (4.6)

如果测得的 SIR 高于一定的上届, BER 被设为 0; 低于一定的下届, BER 被设为 0.5。其上届与下届如表 4.5 所示:

表 4.5 SIR 的上届与下届

接收端	SIR 的上届	SIR 的下届
蓝牙	20dB	1dB

根据每个信道计算得到的 BER 值, 将误码率 BER 的门限值设为 P_f , 如果某信道的 BER 大于 P_f , 则认为信道被干扰, 该信道为‘坏’信道, 将其从频率集中去除。此门限的选择在通信过程的不同阶段可以不同。

假设有一个蓝牙微网与 IEEE802.11b 无线设备共存, 蓝牙微网包括两个或更多的蓝牙设备以便至少可以建立一个点到点的链路连接。大多数蓝牙设备的发射功率限制为 1mW (0dBm), 根据公式(4.1)和(4.2)以及传输参数中的设备位置定义的蓝牙主从设备间的距离 d , 可以计算出蓝牙接收端的接收信号功率为:

$$P_{RS} = P_T - L_P$$

$$= +0 \text{dBm} - L_P$$

$$\text{若 } d < 8 \text{m}, P_R = +0 \text{dBm} - (40.2 + 20 \log(d)) = -40.2 - 20 \log(d) \text{dBm};$$

$$\text{若 } d > 8 \text{m}, P_R = +0 \text{dBm} - (58.5 + 33 \log(d/8)) = -58.5 - 33 \log(d/8) \text{dBm}.$$

再通过公式(4.4)和(4.6)即可得到蓝牙分组的 BER 值。根据分组传输类型，每个分组占用时隙数，确定每个分组的占用时间，在该时间段内，分组跳频频率不变，因此该时间段内得到的 BER 值既是该跳频频率所对应的信道的 BER 值，通过门限值确定该信道的分类。以此类推，根据下一相同时间段内的 BER 值可确定下一跳频信道的分类，直到整个跳频序列中跳频信道的分类确定完为止。

4.3.2 自适应跳频序列的产生

1. 自适应跳频选择内核^{[33], [34]}

根据蓝牙标准 1.2 版本，包括自适应跳频的跳频选择机制概图如图 4.7 所示。从输入到特殊 RF 信道指示的映射在选择箱完成。选择箱的输入是已选时钟，frozen clock，N，k_{offset}，地址，序列选择和 AFH_channel_map。时钟输入值依赖于跳频序列选择。序列选择输入可以设置为以下值：寻呼扫描，查询扫描，寻呼，查询，主设备寻呼响应，从设备寻呼响应，查询响应，基本信道，自适应信道。

当选择自适应跳频序列时，选择箱附加 AFH_channel_map，AFH_channel_map 根据信道的分类指示哪些信道可以使用哪些不可以使用。

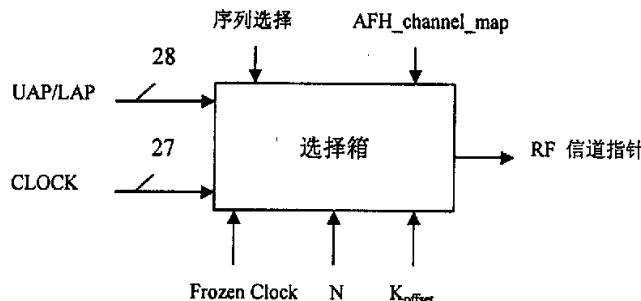


图 4.7 通用跳频选择机制概图

RF 信道指针输出一个伪随机序列，被映射为 RF 信道频率。

跳频范围	RF 信道
2.400-2.4835GHz	f=2402+k MHz, k=0,...,78

当使用自适应跳频序列时，伪随机序列仅仅包含 AFH_channel_map 输入定义的 RF 信道集中的频率。

AFH_channel_map 包括两个部分：分段序列发生器和频率再映射功能。因此自适应跳频内核如图 4.8 所示，其中跳频选择箱与蓝牙标准 1.1 版本中的跳频选

择箱一样，下面将主要讨论分段序列发生器和频率再映射功能。

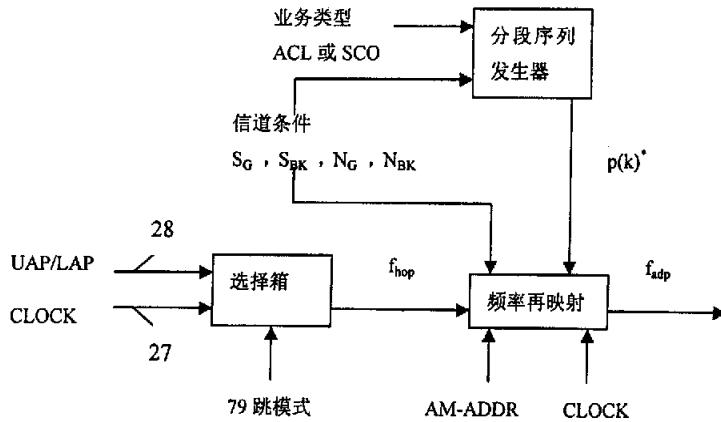


图 4.8 APH 结构图

当 $N_G \geq N_{\min}$, $p(k) = 1$; 当 $N_G < N_{\min}$, $p(k) = 0$ 或 1

2. 分段序列发生器^{[34],[35],[36]}

AFH 机制的第二部分是分段序列发生器，从跳频选择箱出来的跳频序列经过分段序列发生器后，产生一个自适应跳频序列，如图 4.9 所示。分段序列中的元素是由一个二进制的 {0,1} 集合组成，‘1’代表好信道的分段，‘0’代表坏信道的分段。分段序列是周期性的 superframe。每个 superframe 有 N_s 个时隙。

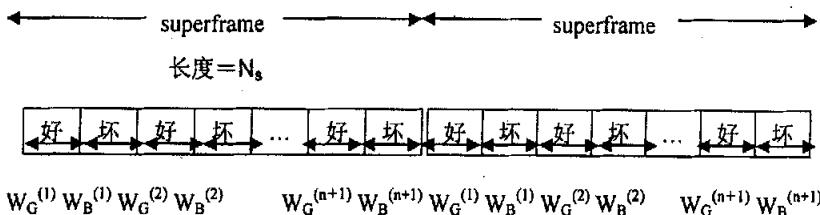


图 4.9 自适应跳频序列结构图

这个特殊的跳频序列有 $W_G^{(1)}$ 个来自好信道集 (S_G) 的连续跳频，跟着是 $W_B^{(1)}$ 个来自坏信道集 (S_{BK}) 的连续跳频，接着是 $W_G^{(2)}$ 个来自好信道集 (S_G) 的连续跳频， $W_B^{(2)}$ 个来自坏信道集 (S_{BK}) 的连续跳频，依此类推。分段序列窗的长度应该是偶数，并满足下面两个等式。

$$W_G^{(i)} \in \begin{cases} \{2, 4, 6, k, 2N_G\} & \text{当 } (i=1) \\ \{0, 2, 4, k, 2N_G\} & \text{当 } (i=2, 3, k, (n+1)) \end{cases}$$

$$W_B^{(i)} \in \{0, 2, 4, 6, k, 2N_{BK}\} \quad \text{当 } (i=1, 2, k, (n+1))$$

‘坏’信道窗的长度可能为 0, ‘好’信道窗的长度除了第一个窗不能为 0 外, 其他窗也可能为 0。分段序列发生器中新增加的结构并没有在每个时隙定义准确的频率, 但是要求跳频频率在这个特殊跳频集内。

该跳频结构可以简单的用一个分段序列表示。该序列定义下一个跳频的信道集 (S_G 或 S_{BK})。在第 k 个时隙, 分段序列可以采用下面两个值中的一个:

$$p(k) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } f_{adp} \text{ 是 } S_G \text{ 元素} \\ 0 & \text{如果 } f_{adp} \text{ 是 } S_{BK} \text{ 元素} \end{cases}$$

分段序列的输出用作频率再映射功能的输入。在这一部分产生一个适当结构的自适应跳频序列。频率再映射功能的基本思想是对原始跳频内核产生的跳频序列统一再映射到由分段序列定义的信道集 (S_G 或 S_{BK}) 上。当频率再映射的输入是常量, 即对于所有的 k , $p(k) = 1$, 产生一个只在好信道上跳变的自适应跳频序列。

自适应跳频机制应该在频谱中提供一张‘好’信道 (S_G) 和‘坏’信道 (S_B) 列表。‘坏’信道进一步分为在跳频序列中保留使用的‘坏’信道 (S_{Bk}) 和从跳频序列中去除的‘坏’信道 (S_{BR})。分段的实际大小依赖于最小跳频信道数 (N_{min}), 等式如下:

$$N_{Bk} = \max(0, N_{min} - N_G)$$

$$N_{BR} = N_B - N_{Bk}$$

图 4.9 定义的序列结构的最佳窗口长度 ($W_G^{(l)}$ 和 $W_B^{(l)}$) 依赖于频带中可用的‘好’信道和‘坏’信道数。首先, 当 $N_G > N_{min}$ 时, 最佳窗口长度为:

$$n = 0, W_B^{(l)} = 0, \text{ and } W_G^{(l)} = 2N_G \Rightarrow p(k) = 1 \forall k.$$

该结果适于 ACL 和 SCO 连接。该结果指示最优跳频的序列结构应只包含‘好’跳频, 即 $p(k) = 1 \forall k$ 。换句话说, 当 $N_G \geq N_{min}$ 时, 应减少自适应跳频频率数, 只在好信道跳变。

当 $N_G < N_{min}$ 时, 通过一系列公式计算出最佳‘好’、‘坏’信道窗的长度, 并且分别对 ACL 链路和 SCO 链路进行序列分段。

(1) ACL 连接

对于 ACL 连接, 可通过下面的方法来降低执行的复杂度。前 n 个‘好’信道窗长度相同 ($(W_G^{(i)} = W_G^{(1)} \text{ for } i \in \{2, \dots, n\})$), 前 n 个‘坏’信道窗长度相同 ($(W_B^{(i)} = W_B^{(1)} \text{ for } i \in \{2, \dots, n\})$)。图 4.10 表示了新的序列的结构。

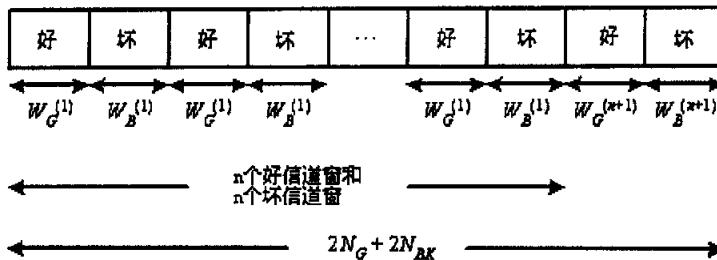


图 4.10 ACL 链路的自适应跳频序列

(2) SCO+ACL 连接

当微网中至少有一个语音连接时，首先，‘好’信道分配给传输语音分组的时隙，因为 SCO 分组没有 ARQ 保护机制，因此分段序列发生器给语音连接提供更高的保护。如果还有余下的‘好’信道，那么这些信道统一分配给 ACL 传输。最后，‘坏’信道分配给剩余的时隙。

假设 V 为 SCO 链路的语音链路类型（分组 HV1, V=1；分组 HV2, V=2；分组 HV3, V=3）。由于语音连接是周期性的，把自适应跳频序列构造为 $(N_G + N_{BK})$ 个帧长是很方便的，每个帧长 $2V$ 个时隙（见图 4.11）。 F_i 表示第 i 个帧。

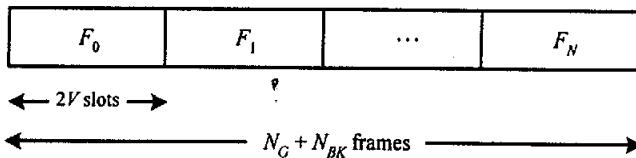


图 4.11 SCO 链路的构造自适应跳频序列

3. 信道再映射功能^[34]

AFH 中使用了自适应跳频选择内核，基本跳频选择内核用于最初的 RF 信道的确定。根据 AFH_channel_map，如果 RF 信道不是分段序列指定的信道集，该 RF 信道由再映射功能映射为一个指定的 RF 信道频率。如果由规则跳频选择内核产生的信道已经属于分段序列指定的 RF 信道集，就不做任何改变，直接输出规则跳频序列产生的跳频，这样可以使微网中的规则蓝牙设备与使用 AFH 的蓝牙设备保持同步。

再映射机制图如图 4.12 所示，规则跳频选择内核的输出 f_k 是一个 0 到 78 编号的 RF 信道号，该 RF 信道要么在可用 RF 信道中，要么在不可用 RF 信道中。其中再映射功能块是把分段序列发生器产生的自适应跳频序列中的跳频信道一一映射成该信道所对应的跳频频率。根据 AFH 中的信道评估分类和频率自适应控制技术，把可用 RF 信道分为‘好’信道集 S_G 和保留使用的‘坏’信道集 S_{BK} 。如果原始跳频内核产生的下一跳频 f_k 正好已经属于 AFH 的分段序列指定的跳频频率集，那么频率再映射功能的输出就是原始跳频 f_k 。但是，如果 f_k 不属于 AFH

分段序列指定的跳频频率集,那么就需对原始跳频内核产生的下一跳频 f_k 进行频率再映射。

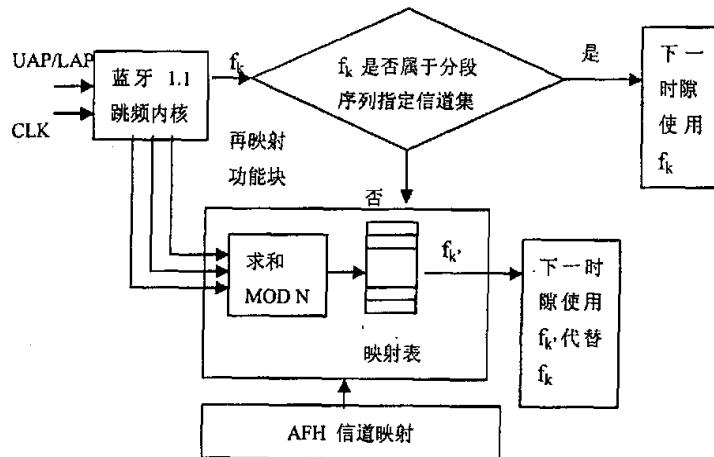


图 4.12 AFH 跳频系统频率选择流图

这时依据分段序列发生器产生的自适应跳频序列,判断下一跳频应属于‘好’信道集 S_G 还是保留使用的‘坏’信道集 S_{BK} , 并根据信道最优化分配原则把 f_k 映射到其中一个信道集的跳频频率上, 产生新的跳频频率 f_k' 。映射表包括按升序排列的可用 RF 信道, 偶数信道在前, 奇数在后。图 4.13 和图 4.14 分别为这两种信道集的再映射功能图。

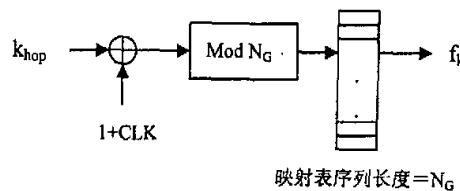


图 4.13 信道集 S_G 的频率再映射功能图

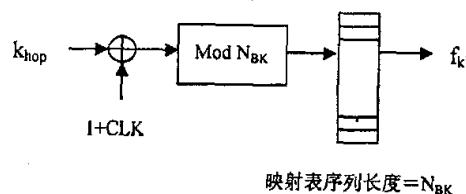


图 4.14 信道集 S_{BK} 的频率再映射功能图

4.4 本章小结

这一章主要介绍了自适应跳频的基本原理和关键技术，重点讨论了自适应跳频在蓝牙中的应用，其中给出了两种信道分类评估方法。分析蓝牙自适应跳频序列的产生过程。

第五章 基于自适应跳频的改进算法

通过前面对自适应跳频基本原理和关键技术的分析介绍,掌握了自适应跳频序列的产生过程和信道分配原则。这一章将基于自适应跳频序列的产生和序列结构,对分段序列发生器提出改进方法。通过对改进算法的详细分析,设计算法流程,给出实现方法,提出有待完善的工作,并且对改进前后的系统性能进行对比。

5.1 改进思想的提出

根据美国 FCC NPRM 规定,低功率蓝牙设备的跳频信道数不能少于 15,高功率设备的最少信道数为 75;欧洲 ETSI 规定 FH 设备的最少信道数为 20。一个 IEEE802.11b 信号就占用蓝牙 23 个信道,如果有多个 IEEE802.11b 接入点,占用的信道将更多,而且多个 802.11b 接入点将越来越普遍,因此,需要考虑跳频序列中存在‘坏’信道的情况。

在前面 4.3.2 的第 3 点提出了自适应跳频机制的三个重要组成部分,其中分段序列发生器是一个核心部分,也是最难实现的部分。分段序列发生器的目的是根据信道分类的‘好’、‘坏’,自适应地改变跳频序列,把‘好’信道和保留使用的‘坏’信道进行分段。

自适应跳频的目的就是为了去除尽可能多的‘坏’信道,如果可以去除所有的‘坏’信道,AFH 只使用‘好’信道,如果不得不使用一些‘坏’信道,必须灵活使用保留的‘坏’信道。

一个“信道对”一般有以下四种分类情况。

- ◆ ‘好, 坏’信道对。从设备返回的是‘坏’信道, 主设备要进行分组重传, 这样就损失一个‘好’信道;
- ◆ ‘坏, 好’信道对。从设备错误接收, 接入码相关器不能触发, HEC 不能进行检测, 没有分组返回主设备, 损失一个‘好’信道;
- ◆ ‘坏, 坏’信道对。从设备错误接收, 接入码相关器不能触发, HEC 不能进行检测, 没有分组返回主设备;
- ◆ 只有‘好, 好’信道对可以在主从设备间进行可靠的传输。

因此我们应该尽可能把‘好’信道配成一对,使分组能成功传输,以提高系统的吞吐量。

由于自适应跳频中的分段序列发生器需要首先确定信道窗的长度,通过参数设定和计算得出信道的分段,然后进行分段序列的改变,最后生成分段序列。这一过程需要的硬件门电路和参数计算很复杂。

因此,基于自适应跳频分段序列发生器的这种功能目的,同时,也为了使自

适应跳频序列的产生过程更简单,这里提出一种改进的信道分配使用算法——即时信道替代算法,它可以代替原有自适应跳频的分段序列发生器,如图 5.1 所示,是一种比分段序列发生器更简单适用的机制,并且可以用于 ACL 链路和 SCO 链路。由于实现方法简单,需要的硬件器件将比分段序列发生器少,不需要首先对跳频序列进行分段,省略了中间复杂的计算过程,同时算法替代还有一个目的是能灵活使用‘坏’信道,有效利用主设备已经存在的‘好’信道,避免‘好’信道的浪费,提高‘好’信道的利用率,从而提高系统性能,下面一节将对该改进算法作详细分析。

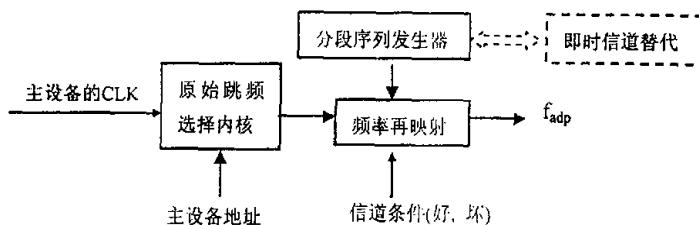


图 5.1 分段序列发生器替代图

5.2 即时信道替代的实现方法

5.2.1 即时信道替代的设计^{[14], [34], [38]}

蓝牙跳频信道都是传输时隙和接收时隙成对出现的。根据蓝牙规范,在蓝牙连接模式里,主从设备的收、发信机的发送和接收过程是交替进行的,其运行模式由以下两图来分别说明。

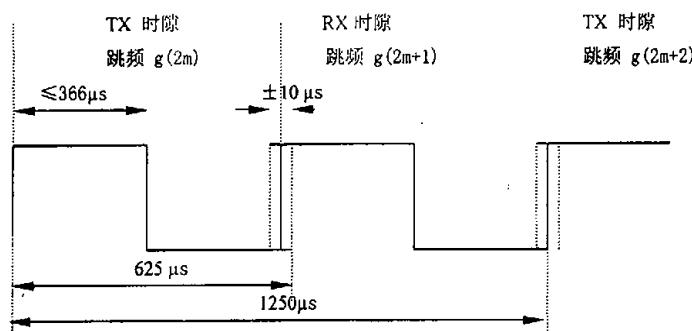


图 5.2 单时隙分组正常模式下蓝牙主收发信机的 RX/TX 周期

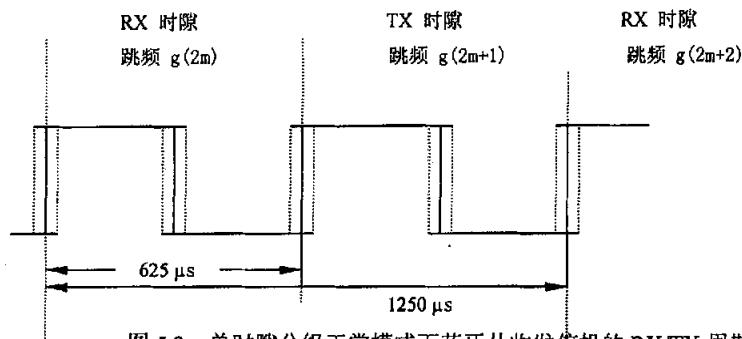


图 5.3 单时隙分组正常模式下蓝牙从收发信机的 RX/TX 周期

在这两个图中都是用单时隙分组来举例说明。根据分组的类型和分组的净荷，分组能够占用 366μs，每个 RX 和 TX 在不同的跳频频率上。

因此，我们得到蓝牙一般收发信道模式，如图 5.4。一个“信道对”包括两个信道：第一个信道是主设备 TX/从设备 RX 信道，位于偶数时隙；第二个信道是从设备 TX/主设备 RX 信道，位于奇数时隙。

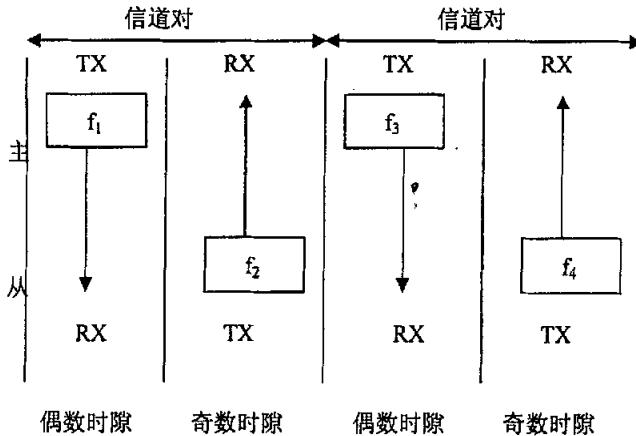
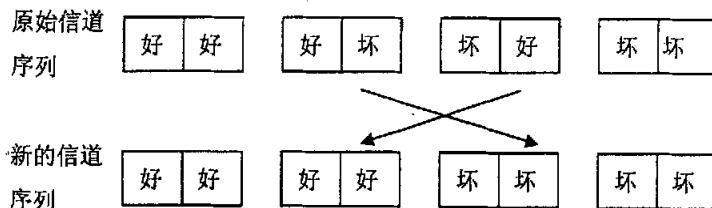


图 5.4 一般收发信道模式

下面是即时信道替代的简单示意图。



原始信道中的‘好，好’信道对和‘坏，坏’信道对仍保持在其原始位置，并且主设备传输信道的‘好’信道保持不变，‘坏，好’信道对被即时替代为‘坏，坏’信道对，‘好，坏’信道对被即时替代为‘好，好’信道对。由于新产生了一个‘好，好’信道对，提高了系统吞吐量。

实际运用时,需要确定最少信道数 N_{min} ,跳频序列中的好信道 G 的个数 ‘ N_G ’ ,可以去除的坏信道 B_N 的个数 ‘ N_{BN} ’ ,必须保留使用的坏信道 B_K 的个数 ‘ N_{BK} ’ ,这时有三种情况需要考虑,它们是:

- (1) 如果 $N_{min} < N_G$, 则 $N_{BK} = 0$, $N_{BN} = 79 - N_G > 0$ 。这是一种理想情况,所有的‘坏’信道都被‘好’信道替换;
- (2) 如果 $N_{min} > N_G$, 则 $N_{BK} > 0$, $N_{BN} > 0$ 。 B_N 被 B_K 或 G 替换,并且灵活使用 B_K ;
- (3) 如果 $N_{min} > N_G$, 则 $N_{BK} > 0$, $N_{BN} = 0$ 。所有的‘坏’信道都保留使用。

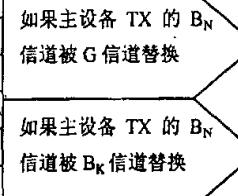
采用即时信道替代的基本规则是:

- ◆ 随机选择一个 G 或 B_K 信道, 替换主设备的 B_N 信道;
- ◆ 如果主设备 TX 信道是(或被替换成) G 信道, 而从设备原始返回信道是 B_K 或 B_N , 则把从设备信道替换成 G 信道, 形成一个‘好, 好’信道对, 保证可靠的传输, 从设备原始返回信道是 G, 则不变;
- ◆ 如果主设备 TX 信道是(或被替换成) B_K 信道, 而从设备原始返回信道是 G 或 B_N , 则把从设备信道替换成 B_K 信道, 形成一个‘ B_K, B_K ’信道对, 以去除 B_N 并可保留一个 G 信道的使用, 从设备原始返回信道是 B_K , 则不变。

为了使说明更加清晰,下面用一个替代过程表进行描述

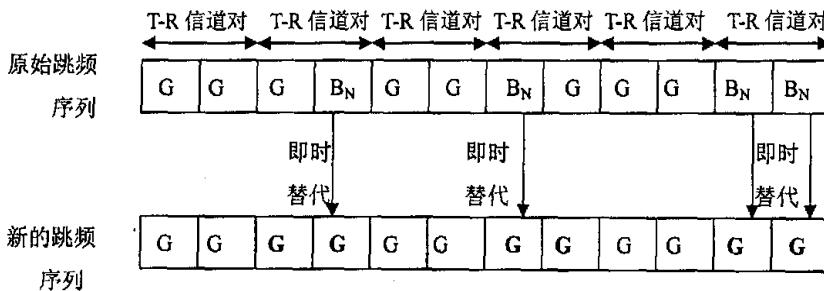
改进算法的 AFH 替代过程表

原始跳频序列中的信道对			使用 B_K 或 G 替换 B_N 后的信道对	
替代情况	主设备 TX 信道	从设备 TX 信道	主设备 TX 信道	从设备 TX 信道
1	G	G	G	G
2	G	B_K	G	G
3	G	B_N	G	G
4	B_N	G	G	G
5	B_N	B_K	G	G
6	B_N	B_N	G	G
7	B_N	G	B_K	B_K
8	B_N	B_K	B_K	B_K
9	B_N	B_N	B_K	B_K
10	B_K	G	B_K	B_K
11	B_K	B_K	B_K	B_K
12	B_K	B_N	B_K	B_K



根据上面提到的即时信道替代替换规则,在实际运用时,对三种情况的系统吞吐量都会有所提高。

(1) 情况一: $N_{BK} = 0$, $N_{BN} > 0$, 用‘好’信道替换所有‘坏’信道。

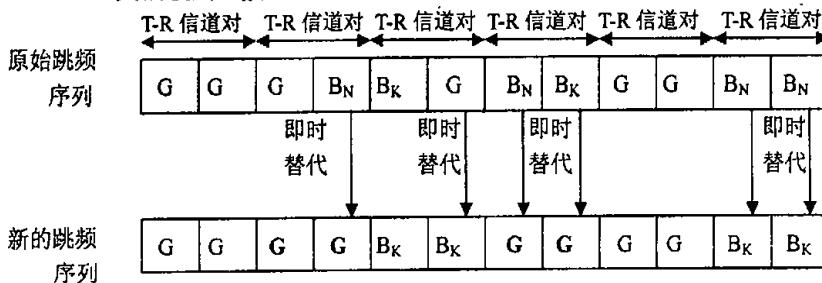


新产生三个‘好, 好’信道对

表 5.1

替换 B_N 前的分组传输				
	原始跳频信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	B_N	失败, 浪费一个好信道	因为从设备返回信道是‘坏’的, 从设备返回的确认接收不到, 主设备需重传该分组
3	B_N	G	失败, 浪费一个好信道	因为主设备 Tx 时隙是‘坏’的, 从设备不能正确接收, 即使返回信道为‘好’也不返回
4	B_N	B_N	失败	不能正确接收
替换 B_N 后的分组传输				
	替换 B_N 后的信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	G	成功	返回信道用一个‘好’信道进行替换
3	G	G	成功	主设备 Tx 信道用一个‘好’信道进行替换
4	G	G	成功	主设备 Tx 信道和从设备返回信道都用一个‘好’信道进行替换

(2) 情况二: $N_{BK} > 0$, $N_{BN} > 0$, 随机选择一个 G 或 B_K 信道替代 B_N 信道, 并且灵活使用 B_K 信道。



新产生两对‘好，好’信道

表 5.2

替换 B_N 并灵活使用 B_K 前的分组传输				
	原始跳频信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	B_K	失败，浪费一个好信道	因为从设备返回信道是‘坏’的，从设备返回的确认接收不到，主设备需重传该分组
3	G	B_N	失败，浪费一个好信道	因为从设备返回信道是‘坏’的，从设备返回的确认接收不到，主设备需重传该分组
4	B_N	G	失败，浪费一个好信道	因为主设备 Tx 时隙是‘坏’的，从设备不能正确接收，即使返回信道为‘好’也不返回
5	B_N	B_K	失败	不能正确接收
6	B_N	B_N	失败	不能正确接收
7	B_K	G	失败，浪费一个好信道	因为主设备 Tx 时隙是‘坏’的，从设备不能正确接收，即使返回信道为‘好’也不返回
8	B_K	B_K	失败	不能正确接收
9	B_K	B_N	失败	不能正确接收
替换 B_N 并灵活使用 B_K 后的分组传输				
	替换 B_N 并灵活使用 B_K 后的信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	G	成功	返回信道用一个‘好’信道进行替换
3	G	G	成功	返回信道用一个‘好’信道进行替换
4	G	G	成功	由于 B_N 可去除，主设备 Tx 信道用一个‘好’信道替换
5	G	G	成功	由于 B_N 可去除，主设备 Tx 信道用一个‘好’信道替换，而且返回信道用一个‘好’信道进行替换
6	G	G	成功	由于 B_N 可去除，主设备 Tx 信道用一个‘好’信道替换，而且返回信道用一个‘好’信道进行替换
4	B_K	B_K	失败	主设备 Tx 信道用 B_K 替换，从设备返回好信道也用 B_K 替换，否则浪费一个好信道
5	B_K	B_K	失败	主设备 Tx 信道 B_N 用 B_K 替换
6	B_K	B_K	失败	主设备 Tx 信道 B_N 用 B_K 替换，从设备返回

				好信道 B_N 也用 B_K 替换
7	B_K	B_K	失败	从设备返回好信道用一个坏信道替换, 否则该好信道被浪费
8	B_K	B_K	失败	不能正确接收
9	B_K	B_K	失败	由于从设备返回信道是 B_N , 用 B_K 替换

(3) 情况三: $N_{BK} > 0$, $N_{BN} = 0$, 保留所有坏信道, 灵活使用 B_K 信道。

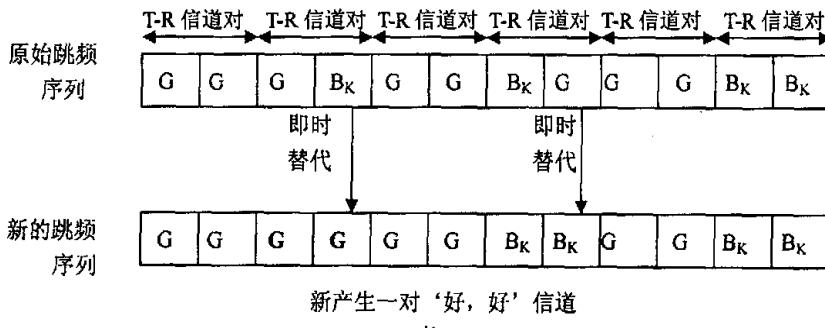


表 5.3

灵活使用 B_K 前的分组传输				
	原始跳频信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	B_K	失败, 浪费一个好信道	因为从设备返回信道是‘坏’的, 从设备返回的确认接收不到, 主设备需重传该分组
3	B_K	G	失败, 浪费一个好信道	因为主设备 Tx 时隙是‘坏’的, 从设备不能正确接收, 即使返回信道为‘好’也不返回
4	B_K	B_K	失败	不能正确接收
灵活使用 B_K 后的分组传输				
	灵活使用 B_K 后的信道对			
情况	主设备 Tx 信道	从设备返回信道	分组传输结果	注释
1	G	G	成功	
2	G	G	成功	返回信道用一个‘好’信道进行替换
3	B_K	B_K	失败	返回信道用一个‘坏’信道进行替换, 保留一个‘好’信道用于情况 2 的替换
4	B_K	B_K	失败	不能正确接收

由上面的分析可知, 对于信道集分布的三种情况, 即时信道替代通过信道的有效分配, 有效利用跳频序列中的‘好’信道, 增加‘好, 好’信道对的个数, 提高蓝牙系统的吞吐量。

5.2.2 即时信道替代的实现方法

主设备的 Tx 信道保留在原始位置，这样有利于微网同步，广播和停等模式的信标信道，并且还可以兼容规则蓝牙设备。因此，在进行即时信道替代时，首先确定主设备的 Tx 信道，再根据主设备的 Tx 信道来确定从设备的 Tx 信道。

根据前面的分析，即时信道替代的实现方法是：

- (1) 通过信道分类评估和自适应频率控制，确定哪个信道属于‘好’信道 G，哪个属于需要排除的‘坏’信道 B_N，哪个属于保留使用的‘坏’信道 B_K。
- (2) 每个信道对包括一个“主设备发射 / 从设备接收 (Master Tx / Slave Rx)”信道和一个“从设备发射 / 主设备接收 (Slave Tx / Master Rx)”信道。

对于 Master Tx / Slave Rx 信道时隙，跳频选择实现方法的流程图如图 5.5，对于 Slave Tx / Master Rx 信道时隙，跳频选择实现方法的流程图如图 5.6。

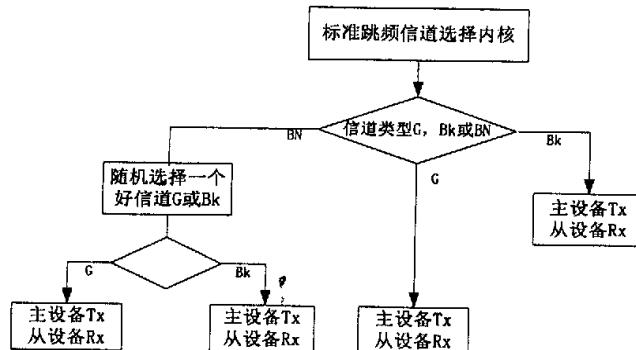


图 5.5 Master Tx / Slave Rx 时隙流程图

当主设备知道它使用的是‘坏’信道时，要么在这一时隙不进行传输，要么传输一个没有净荷的短分组，要么减小发射功率。

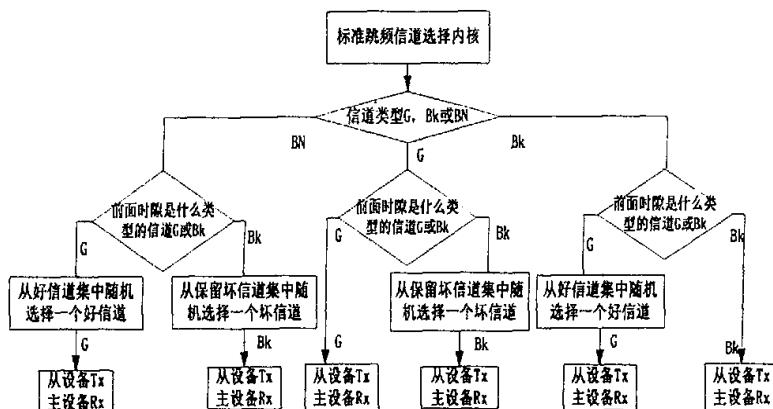


图 5.6 Slave Tx / Master Rx 时隙流程图

当先前的主设备 Tx 信道是 Bk 时，要么从设备发生接收错误，要么主设备没

有传输任何信息，因此，在从设备返回时隙，不向主设备返回任何信息。

根据上面即时信道替代的两个算法流程图，下面将分别给出对主设备 Tx / 从设备 Rx 时隙和从设备 Tx / 主设备 Rx 时隙进行跳频选择实现的伪代码。

```

/*如图 5.5 主设备 Tx / 从设备 Rx 时隙 -偶数时隙 */
If (CLK1-0 = 11) Then,
    /* 检查分类表中 Fnext 的分类 */
    If (Classification of Fnext is BN), Then
        /* 从 SGBK 中随机选择一个‘好’信道或‘Bk’信道，保持‘好’‘坏’信道的均匀使用*/
        Fadp = SGBK(RAND mod NGBK)
    Else /* Fnext 是 G or BK */
        Fadp = Fnext      / 如果 Fnext 是 BK, 主设备不进行传输 */
    End
End

/* 如图 5.6 从设备 Tx / 主设备 Rx 时隙 -奇数时隙*/
If (CLK1-0 = 01) Then,
    /*检查分类表中 Fnext 的分类*/
    If (Classification of Fnext is BN), Then
        /*检查最近主设备 Tx 时隙的跳频 FMTX 类型*/
        If (FMTX was BK), Then
            Fadp = SBK(RAND mod NBK) /* 从 SBK 中随机选择一个 ‘Bk’ */
        Else, /*FMTX 是一个‘好’信道 G*/
            Fadp = SG(RAND mod NG) /*从 SG 中随机选择一个‘好’信道*/
        End
    End
    If (Classification of Fnext is BK), Then
        /*检查最近主设备 Tx 时隙的跳频 FMTX 类型*/
        If (FMTX WAS BK), Then
            Fadp = Fnext
        Else, /*FMTX 是一个‘好’信道 G */
            Fadp = SG(RAND mod NG) /*从 SG 中随机选择一个‘好’信道*/
        End
    End
If (Classification of Fnext is G), Then

```

```

/*检查最近主设备 Tx 时隙的跳频 FMTX 类型*/
If (FMTX WAS BK), Then
    Fadp = SBK(RAND mod NBK) /*从 SBK 中随机选择一个 'BK' */
Else, /*FMTX 是一个'好'信道 G */
    Fadp = Fnext
End
End
End

```

在实际的应用环境中，信道替代的实现涉及整个自适应跳频系统的实现。首先需要形成一张信道分类列表，判断信道的‘好’、‘坏’；其次，根据规定使用的最少信道数 N_{min} ，确定蓝牙跳频的每个信道分别属于‘G’、‘B_K’或者‘B_N’；最后，在执行信道替换时，为了保持‘好’、‘坏’信道的均匀使用，保证跳频频谱有较好均匀性，替代算法的复杂性也相应增加。由于技术条件的限制，本文只是对自适应跳频序列的产生方法进行了改进，并给出了实现方法，对于自适应跳频序列的频谱均匀性问题，还需要进一步完善，这将是我们下一步要研究解决的重点。

5.2.3 改进算法的优越性

1. 首先，即时信道替代是在每个信道对上进行即时信道的替代，不需要复杂的分段序列发生器；
2. 改进后的算法适用性更大。即时信道替代是在原始跳频序列的基础上，根据整个跳频序列的信道条件和主设备的传输信道条件进行信道的配对，因此不论是 ACL 链路或 SCO 链路都可以使用，而分段序列发生器需要分别对 ACL 链路和 SCO 链路进行序列分段，且分段过程复杂；
3. 微网同步性更好。当主设备传输信道是好信道时，主设备信道不做改变，固定在跳频序列的原始位置，有利于微网同步，广播分组等。
4. 同样可以和原始设备兼容。
5. 改进后系统性能有所提高。

下面通过对 ACL 链路的跳频序列进行分析，比较两者的系统性能。

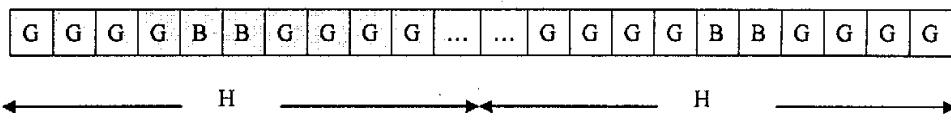
蓝牙采用时分双工的方式在信道上通过分组进行消息交换，每个分组在不同的跳频频率上进行发送，主从设备的收发信道是成对出现的，只有主设备和从设备的发送 / 接收信道都为好信道时，分组才能成功传输，因此，最后生成的跳频序列中的‘好、好’信道对越多，分组传输的成功率越高，系统性能也越高。

- (1) 单个微网具有相同性能时，即时信道替代的多微网性能较高。

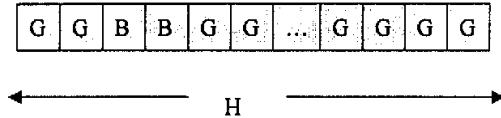
为了保证自适应跳频序列的每个好信道窗中的好信道能够成对出现，在进行 ACL 分组传输时，分段序列发生器所产生的自适应跳频序列的一个周期内的好坏跳频总数必须等于 $2 N_G + 2 N_{BK}$ ，因此，分段序列的周期应等于 $2 N_G + 2 N_{BK}$ ，如图 4.10 所示。

假设蓝牙 79 个跳频中有 N_G 个好信道， N_{BK} 个保留使用的坏信道。自适应跳频序列可使用的信道数为 $N_G + N_{BK}$ 个，从图 4.10 可以看出，分段序列产生的自适应跳频序列中‘好’跳频次数是‘好’跳频信道个数 N_G 的两倍，因此，蓝牙系统中存在的的一些‘好’信道将被自适应跳频序列两次或多次使用，‘好’信道被使用的频率提高了，当存在多个蓝牙微网时，这些多次被使用的‘好’信道发生碰撞的概率也将提高，这就导致不同微网蓝牙设备之间的冲突增多，微网的性能因此而下降。

在两者的‘好’信道个数相同的情况下，即时信道替代没有强制扩展序列周期，只是充分利用原始跳频序列中存在的‘好’信道，在既可以保证‘好’信道成对出现的同时，又可降低每个‘好’信道被重复利用的频率。



5.7 (a) 分段序列发生器生成的自适应跳频序列($2 N_G + 2 N_{BK}$)



5.7 (b) 即时信道替代生成的自适应跳频序列($N_G + N_{BK}$)

为了便于比较，假设在一个相同的跳频时间周期 T 内，可以进行 H 次跳频，如图 5.7 (a)、5.7 (b) 中的阴影部分， $H=N_G+N_{BK}$ ， H 长的自适应跳频序列中两者都具有相同数目的‘好、好’信道对。分段序列发生器的一个周期包含两个时间周期 T 。蓝牙信道跳频序列在频段内是均匀分布的。

因此，(b) 序列中 T 时间段内每个‘好’信道的使用频率 $f_i^b = \frac{1}{T}$ ，($i=1, 2, \dots, N_G$)，

(a) 序列中 T 时间段内每个‘好’信道的使用频率

$$f_i^a \begin{cases} = \frac{1}{T} \\ > \frac{1}{T} \\ = 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, N_G),$$

并且, 为了保证信道的均匀使用, 在这一时间段 T 内使用频率为 0 的信道, 将在下一时间段 T 内被重复使用, 其频率 $f_i^a >= \frac{1}{T}$ 。

因此, 在分段序列一个循环周期时间内, 分段序列发生器中‘好’信道的平均使用频率 $>=$ 即时信道替代中‘好’信道的平均使用频率。所以, 单个微网下, 由于具有相同数目的‘好、好’信道对, 两者具有相同的系统性能, 多个微网时, 由于在短时间内分段序列中信道的使用频率比即时替代中信道的使用频率大, 传输信道发生冲突碰撞的概率也大, 因此, 即时替代的系统性能将大于分段序列。

(2) 假设分段序列循环周期仍为 $N_G + N_{BK}$, 并且‘好’信道不重复使用, 即时替代系统性能更高^[27]。

分段序列结构仍为图 4.10 所示, 将循环周期改为 $N_G + N_{BK}$, 因此, 计算信道窗长度的公式中相应参数的系数 2 去掉, 得到下面的结果。

给定 n 的值 ($n > 0$), n 值与 $W_G^{(i)}$ 和 N_{BK} 有关, 那么好信道窗长度的最佳值可以确定为:

$$W_G^{(i)} = \left[\frac{N_G}{n+1} \right]$$

$$W_G^{(n+1)} = N_G - nW_G^{(1)}$$

因此, 在这样一个分段序列中, 前 n 个好信道窗中每个好信道窗包含的好信道数为 $\left[\frac{N_G}{n+1} \right]$ 。

a) 如果 $\left[\frac{N_G}{n+1} \right]$ 为奇数, 假设 $\left[\frac{N_G}{n+1} \right] = 2m+1$, 好信道对为 m 对

前 n 个好信道窗总共的好信道对是 $m*n$,

最后一个好信道窗有好信道 $N_G - (2m+1)*n$, 好信道对有 $\left[\frac{N_G - n}{2} \right] - m*n$,

分段序列中一共有好信道对 $D_{\text{分}} = \left[\frac{N_G - n}{2} \right]$,

即时替代是基于每对信道的替代, 因此, N_G 个好信道可形成‘好、好’信道

对 $D_{即} = \left[\frac{N_G}{2} \right]$, 显然, $D_{即} \geq D_{分}$ 。

b) 如果 $\left[\frac{N_G}{n+1} \right]$ 为偶数, 假设 $\left[\frac{N_G}{n+1} \right] = 2m$, 好信道对为 m 对,

前 n 个好信道窗总共的好信道对是 $m * n$,

最后一个好信道窗有好信道 $N_G - 2m * n$, 好信道对有 $\left[\frac{N_G}{2} \right] - m * n$,

分段序列中一共有好信道对 $D_{分} = \left[\frac{N_G}{2} \right]$,

即时替代是基于每对信道的替代, 因此, N_G 个好信道可形成‘好、好’信道对 $D_{即} = \left[\frac{N_G}{2} \right]$, $D_{即} = D_{分}$ 。

综上, $D_{即} \geq D_{分}$, 因此, 在循环周期相同, 且不重复使用好信道的情况下, 即时信道替代的系统性能比分段序列高。

5.3 本章小结

本章首先分析了改进思想的提出, 然后根据蓝牙信道传输特性以及自适应跳频基本原理, 重点讨论并提出了分段序列发生器改进方案的设计以及实现方法, 最后对比给出了改进算法的优越性。

第六章 结束语

在传统的有线工业控制网络应用中,布线的成本有时会大大超过其它控制设备的成本,而且电缆的连接也限制了现场设备的移动和网络的重组,通信节点往往受到各种环境条件的限制,无法实现有线连接。这种情况下,实现智能节点间的无线互联就显得极为重要。IEEE802.11b 技术和蓝牙技术是目前颇具优势的为人们提供网络服务的无线技术,因此,在工业控制网络中引入 802.11b 和蓝牙通信技术,结合工业控制有线网络设计全新的无线/有线混合工业控制网络通信体系,既是降低投资成本的需要,也是解决现实问题的迫切要求。

鉴于此,本课题组参与了国家标准《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》的讨论与制定,并承担其中“EPA 网络中的 802.11b 接入标准”的起草工作。查新表明,目前国内外还没有有关控制网络中的 802.11b 接入协议方面的报道。同时,本课题组还着重对 802.11b 与蓝牙的共存性问题展开了研究。

由于 802.11b 和蓝牙技术均工作在无许可限制的 2.4GHz ISM 频带,随着两种无线技术在工业控制网络中的广泛应用,势必形成两者的共存干扰。目前以 IEEE802.15.2 为主的共存工作组建议了两种类型的共存机制,一类是协作式共存机制,另一类是非协作式共存机制,其中最为引人注目的是自适应跳频方法。在从事本课题研究期间,这一技术规范还处于起草探讨阶段,并没有成熟的产品推出。为了跟踪先进的共存解决技术,为后期应用自适应跳频解决干扰问题,适应共存应用的发展需要,本课题的研究具有非常现实的意义。

本文针对蓝牙和 802.11b 技术特点,分析了两者共存会产生的相互干扰,结合 IEEE802.15.2 共存工作组所提出的几种共存机制,选用了目前研究最为广泛的非协作式共存机制—自适应跳频作为本论文的研究内容。对自适应跳频基本原理、关键技术的实现方法、自适应跳频在蓝牙中的应用等问题进行了深入的研究。结合蓝牙传输特性和自适应跳频原理,对自适应跳频机制中的分段序列发生器进行了改进和性能分析。这些研究工作将为其它的后续系统开发提供一个良好的开端,也给后续工作提供了较充分的理论分析基础和研究方法。

另外,由于测试环境的限制,给系统的实现带来局限性和不完善性。因此,自适应跳频在蓝牙和 802.11b 共存系统中的具体实现还有待今后的完善,并结合其它共存机制,不断完善和改进它,才能提供更优性能的蓝牙和 802.11b 共存应用。

致 谢

本文是在导师王平教授的悉心指导下完成的。在攻读硕士期间，王老师无论是在学习上还是在生活上都给了我无微不至的关怀和帮助。王老师渊博的知识、严谨的治学态度和勤奋的工作作风给我留下了深刻的印象，并深深地陶冶了我。三年来，本人在王老师的指导下完成了多项科研课题的研究开发工作，使我各方面的能力均得到了锻炼和提高，在此谨向王老师表示衷心的感谢！

同时本文也是在导师鲜继清副教授的支持下完成的。在三年的研究生学习期间，鲜老师在学习、工作、生活上给予我很大的关心和帮助。在此谨向鲜老师表示衷心的感谢！

感谢邮政自动化控制技术重点实验室和自动化学院的各位老师、以及实验室的全体师兄师弟师妹们给我多方面的帮助！

感谢父母多年来含辛茹苦的支持和亲朋好友的鼓励帮助，使我得以顺利的完成学业！

衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

攻读硕士学位期间从事的主要科研工作及发表的论文

1. 从事的主要科研工作

- (1) 国家“863”项目：基于“蓝牙”技术的工业现场设备、监控网络及其关键技术研究（编号：2001AA413620）。
- (2) 国家标准：《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》（编号：20022129-T-604, 20022130-T-604）。

2. 发表的论文

- (1) 徐润, 王平, 鲜继清. 蓝牙与 802.11b 的非协作共存技术 AFH. 计算机应用, 2003.12 增刊。
- (2) 徐润, 鲜继清. 干扰环境中提高蓝牙系统性能的技术. 通信技术, 2003 年第 9 期。
- (3) 徐润, 鲜继清. 蓝牙技术在工业系统中的应用. 重庆邮电学院学报（自然科学版）, 2003 年第 4 期。

参考文献

- 【1】 张禄林, 雷春娟, 郎晓虹等, 《蓝牙协议及其实现》, 人民邮电出版社, 2001 年 10 月。
- 【2】 Beijing Noyas NetWork Development Co.Ltd , 无线局域网基础教程, 2002。
- 【3】 廖智军, 冯冬芹, 褚健, 无线局域网应用于工业控制系统研究, IEC-TC124 全国工业工程测量和控制标准化委员会。
- 【4】 陶波, 丁汉, 熊有伦, 基于嵌入式 Internet 的工业控制, 测控技术, 2001 年 8 月, 第 20 卷第 8 期, 37~41。
- 【5】 Peter T.Davis , Craig R.McGuffin , Wireless Local Area NetWorks--Technology, Issues, and Strategies, McGraw-Hill, Inc. 1995.
- 【6】 Mats Andersson. Industrial Use of Bluetooth . <http://www.connectblue.se/>, 2001.04.18.
- 【7】 杨华, 张震, 无线局域网在工业控制中的应用, 通信技术, 2002 年 9 月。
- 【8】 《用于工业测量与控制系统的 EPA (Ethernet for Plant Automation) 系统结构和通信标准》, 2004 年 3 月。
- 【9】 IEEE Std. 802-11, “IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification” . June 1999.
- 【10】 Micheal Barkway, IEEE802.11 and Bluetooth, June 2002.
- 【11】 Charles Hodgdon, Ericsson Technology Licensing, Adaptive Frequency Hopping for Reduced Interference between Bluetooth and Wireless LAN, May 2003.
- 【12】 Nikkei Electronics , 无线 LAN 与蓝牙的干扰问题有望解决 , <http://www.sina.com.cn> , 2001 年 05 月。
- 【13】 沈连丰, 皱乐, 宋扬, 宋铁成, 一种适用于 WPAN 应用环境的高速自适应跳频系统及其性能分析, 电子学报, Vol.30, 2002 年 10 月。
- 【14】 Bluetooth SIG. Specification Volume 1 Specification of the Bluetooth System Core, version 1.1 [s], February 22, 2001.
- 【15】 王毅译, Wi-Fi 及蓝牙 2.4GHzISM 频段共存解决方案, 今日电子, 2002 年第 10 期。
- 【16】 付伟明, IEEE802.11b 与蓝牙系统的共存, 无线电工程, 第 32 卷, 第 8 期, 2002 年。
- 【17】 Mobile Platform Group Intel Corporation ,for coexistence of Bluetooth and IEEE 802.11b Radio Transceivers,February,2002.
- 【18】 MobilianCorporation, Wi-Fi™ (802.11b) and Bluetooth Simultaneous Operation: Characterizing the Problem, November 2000.

- 【19】 LAN / MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, IEEE Std 802.15.2TM:Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands:8-12, 2003.
- 【20】 俞世荣, 李渊渊, 自适应跳频技术及其实现, 无线电工程, 第 31 卷, 第 1 期, 2001 年。
- 【21】 Hongbing Gan, Bijan Treister, et al. 00313r1P802-15_TG2, Adaptive-Frequency-Hopping[1].ppt, Bandspeed Inc. March 2001.
- 【22】 韩娟娟, 刘乃安, 张金平, AFH—使蓝牙与 Wi-Fi 共存, 无线电工程, 第 33 卷, 第 1 期, 2003 年。
- 【23】 Mobilian Corporation. Wi-Fi(802.11b) and Bluetooth: An Examination of Coexistence Approches, April 2001.
- 【24】 Tim Godfrey, 802.11 and Bluetooth Coexistence Techniques, Intersil, November 2002.
- 【25】 David hytha, Terry Bourk, and Joel Linsky, Bluetooth Adaptive Hopping: tech Challenges and Regulatory Headaches, CommsDesign.com, February 2002.
- 【26】 B. Treister, H. Gan, E. Skafidas, V. Sapozhnykov, et. al. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Clause 14.3 Adaptive Frequency Hopping , August 2001.
- 【27】 采用 CQDDR 方案提高蓝牙设备抗干扰性能, www.chinawlan.net, 2003。
- 【28】 YC Maa et.al, A. Batra et.al., IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Draft for Channel Classification, Jan 2002.
- 【29】 Jie Liang, Proposal for Non-Collaborative BT Mechanisms for Enhanced Coexistence, July 2001.
- 【30】 Jim Lansford, Adrian P Stephens, IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), (Combined) Mobilian and NIST Text for Clause 6, September 2001.
- 【31】 Jim Zyren , Reliability of IEEE 802.11 Hi Rate DSSS WLANs in a high Density Bluetooth Environment, jzyren@intersil.com, June 1999.
- 【32】 Vinay Mitter/Ivan Howitt] Company [University of Wisconsin-Milwaukee, Empirical Study for 802.11 b & Bluetooth Coexistence, March 2001.
- 【33】 Anuj Batra, Kofi Anim-Appiah, and Jin-Meng Ho, An Intelligent Frequency Hopping Scheme for Improved Bluetooth Throughput in an Interference-Limited Environment, batra@ti.com, January 2001.
- 【34】 Bluetooth SIG. Specification Volume 1 Specification of the Bluetooth System Core, version 1.2 [s], November, 2003.

- 【35】 Greg Ellard , Vitaliy Sapozhnykov, HongBing Gan, Bijan Treister, Efstratios Skafidas ,Bandspeed Inc. Why Use of Bad Channels Should Be Optional, November 2001.
- 【36】 Anuj Batra, IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Need for a Partition Sequence Generator, November 2001.
- 【37】 Hongbing Gan, Bijan Treister, et al. 00367r1P802-15_TG2, Adaptive-Frequency-Hopping[1].ppt, Bandspeed Inc. March 2001.
- 【38】 KC Chen, HK Chen, CC Chao, Selective Hopping for Hit Avoidance, January 2001.